

**Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft**  
**Technische Universität Darmstadt**



**Auswirkungen von Wasserqualität und Feststoffen auf  
Wärmequellenanlagen in Fließgewässern und Entwicklung von  
Gestaltungsempfehlungen für konstruktive Schutzmaßnahmen**

Am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Technischen Universität Darmstadt angefertigte und  
beim Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik vorgelegte

**Masterthesis**

von

**Franziska Baunach**

aus Würzburg (Matrikelnummer 2110396)

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lehmann

Tag der Einreichung: 23.12.2019

Darmstadt, im Dezember 2019

**Auswirkungen von Wasserqualität und Feststoffen auf Wärmequellenanlagen  
in Fließgewässern und Entwicklung von Gestaltungsempfehlungen für  
konstruktive Schutzmaßnahmen**

*Effects of Water Quality and Solid Materials on Heat Source Systems in River Waters  
and Development of Design Criteria for Constructional Inlet Protection*

Korrigierte Fassung vom 16.03.2020

*Veröffentlicht unter CC BY 4.0 International*

Masterthesis von:

Franziska Baunach

franziska.baunach@web.de

Matrikelnummer: 2110396

Studiengang: M. Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Eingereicht: 23. Dezember 2019

Ansprechperson: Steve Borchardt M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Technische Universität Darmstadt

Franziska-Braun-Straße 7

64287 Darmstadt

## Kurzfassung

Der weltweit steigende Energiebedarf aufgrund von Bevölkerungswachstum und Wohlstandssteigerung wird bislang überwiegend durch die Verbrennung fossiler Energieträger gedeckt. Angesichts des fortschreitenden Klimawandels und der Endlichkeit von Energieressourcen ist jedoch eine langfristige Entwicklung hin zu der Nutzung regenerativer Energiequellen sowie einer Steigerung der Energieeffizienz erforderlich.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Nutzung von thermischer Energie aus regenerativen Quellen, wie bspw. dem Erdreich oder dem Grundwasser, mithilfe von Wärmepumpen zunehmend an Bedeutung. Auch Fließgewässer verfügen über ein großes Wärmepotenzial und können als Wärmequellen genutzt werden. Der Betrieb von Wärmequellenanlagen in Fließgewässern ist jedoch mit einigen Herausforderungen verbunden, da insbesondere die Wasserqualität und mitgeführtes Feststoffmaterial zu einer Beeinträchtigung der Wärmeentzugsleistung und mechanischen Schäden an der Anlage führen können.

In dieser Arbeit werden die Auswirkungen von Wasserqualität und Feststoffen auf Wärmequellenanlagen in Fließgewässern untersucht. Im Rahmen einer Literaturrecherche werden dafür die relevanten Wasserqualitätsparameter und Feststoffarten ermittelt und im Hinblick auf eine Beeinträchtigung der Wärmeübertragung analysiert. Eine hohe Ablagerungsbildung an den wärmeübertragenden Flächen führt demnach zu einer Reduktion der Wärmeentzugsleistung und findet insbesondere bei einer großen Verfügbarkeit von Nährstoffen und Mikroorganismen sowie geringen Fließgeschwindigkeiten im Bereich des Wärmeübertragers statt. Diese Erkenntnisse konnten durch experimentelle Untersuchungen an Wärmeübertragersystemen mit biologischem Bewuchs bestätigt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit einer mechanischen Beschädigung oder Verlegung des Wärmeübertragers durch grobes Feststoffmaterial, wodurch es sowohl zu einer Einschränkung des Betriebs als auch zu einer verringerten Entzugsleistung an der Anlage kommen kann. Um Wärmequellenanlagen vor diesen Einwirkungen zu schützen, wurden Gestaltungsempfehlungen für konstruktive Schutzmaßnahmen entwickelt.

## Abstract

The increasing global energy demand due to population growth and an increase in prosperity is to date mainly covered by the combustion of fossil energy sources. Considering the advancing climate change and finite nature of energy resources, however, a long-term development towards the use of renewable energy sources and an increase in energy efficiency is necessary.

In this context, the generation of thermal energy from renewable sources such as geothermal or hydrothermal energy sources by using heat pumps is gaining importance. Flowing waters also have a great heat potential and can be used as heat sources. However, the operation of heat source systems in flowing waters comes with several challenges as water quality and solid materials can lead to an impairment of the thermal extraction and mechanical damages to the system.

This thesis investigates the effects of water quality and solids on heat source systems in flowing waters. Within the scope of a literature review, the relevant water quality determinants and solid types are identified and analysed with regard to their impairment of heat transfer. According to this research, a high formation of deposits on the heat transfer surfaces leads to a reduction of the thermal extraction, particularly when nutrients and microorganisms are highly available and flow velocities near the heat exchanger are low. These findings were confirmed by experimental investigations on heat transfer systems with biological fouling. Furthermore, there is a possibility of mechanical damage or blockage of the heat exchanger by large solid materials, which causes restrictions of the operation mode and a reduced heat extraction. In order to protect heat source systems from these effects, design criteria for constructional inlet protection have been developed.

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	iii
Abbildungsverzeichnis .....	iv
Tabellenverzeichnis .....	vi
1. Einleitung .....	1
2. Wärmetechnische Nutzung von Fließgewässern .....	5
2.1 Wärmehaushalt von Fließgewässern.....	5
2.2 Funktionsprinzip eines Wärmeübertragers.....	9
2.3 Systeme zur wärmetechnischen Nutzung von Fließgewässern .....	11
3. Wasserqualität und relevante Einflussgrößen .....	15
3.1 Beschaffenheit und Güteklassifizierung oberirdischer Fließgewässer .....	15
3.2 Verschmutzungen an Wärmeübertragungsflächen .....	20
3.2.1. Beeinflussung des Wärmeübergangs durch Biofouling.....	26
3.2.2. Schädigung der Werkstoffe durch Korrosion.....	31
3.3 Maßnahmen zur Reduzierung und Vermeidung von Verschmutzungen .....	35
4. Feststoffe in Fließgewässern.....	40
4.1 Feststoffarten und Terminologie.....	40
4.2 Eintrags- und Transportprozesse .....	43
4.3 Rechtliche Grundlagen zur Entnahme von Rechengut .....	49
4.4 Auswirkungen von Feststoffen auf Wärmequellenanlagen .....	51
5. Experimentelle Untersuchungen.....	55
5.1 Aufbau der Versuchsanlage .....	55
5.2 Methodik und Messtechnik.....	57
5.2.1. Betriebszustand und Einfluss der Fließgeschwindigkeit .....	57
5.2.2. Messtechnik .....	61
5.2.3. Geschwindigkeitsmessungen mit ADV .....	63
5.3 Untersuchungen am Wärmeübertragersystem „TwinSheet“ .....	66

5.4	Auswirkungen von Biofouling auf die Wärmeentzugsleistung .....	69
5.5	Alternativer Berechnungsansatz .....	83
6.	Gestaltungsempfehlungen für konstruktive Schutzmaßnahmen .....	86
6.1	Einlaufschutz.....	87
6.2	Leitrechen .....	94
7.	Fazit und Ausblick.....	99
	Literaturverzeichnis.....	102
	Anhang .....	A-1

## Abkürzungsverzeichnis

ADV	Acoustic Doppler Velocimeter
BFE	Bundesamt für Energie (Schweiz)
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
COP	Conference of the Parties
EG	Europäische Gemeinschaft
EPS	Extrazelluläre polymere Substanzen
EU-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
MIC	Microbially influenced corrosion (mikrobiell beeinflusste Korrosion)
MID	Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät
NN	Normalnull
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
SRB	Sulfatreduzierende Bakterien
UWP	Umwälzpumpe
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WQ	Wärmequelle
WQA	Wärmequellenanlage

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Endenergieverbrauch in Deutschland .....	2
Abbildung 2-1: Natürliche Einflussfaktoren auf die Temperaturverhältnisse in Fließgewässern .....	6
Abbildung 2-2: Charakteristische Jahresganglinien der Flusswassertemperaturen und Lufttemperaturen .....	7
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung eines Wärmeübertragers .....	10
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Bauarten von Wärmeübertragern.....	11
Abbildung 2-5: Wärmequellenanlage im offenen System .....	12
Abbildung 2-6: Wärmequellenanlage im geschlossenen System .....	13
Abbildung 2-7: Wärmequellenanlage als gesplittetes System .....	13
Abbildung 3-1: Konzentrationsbereiche der chemischen Bestandteile in typischen Süßwässern.....	16
Abbildung 3-2: Ökologische Zustandsbewertung der Fließgewässer in Deutschland .....	20
Abbildung 3-3: Verschiedene Ablagerungs- und Abtragungsvorgänge an einer Fouling- schicht.....	22
Abbildung 3-4: Zuwachs der Foulingschicht über die Zeit.....	23
Abbildung 3-5: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf den Foulingwiderstand mit abnehmender Wasserqualität .....	24
Abbildung 3-6: Foulingmechanismen in Flüssigkeitsströmungen.....	25
Abbildung 3-7: Schematischer Ablauf der Bildung von Biofilmen.....	28
Abbildung 3-8: Einfluss des Nährstoffgehalts auf den Wärmeübergangswiderstand .....	29
Abbildung 3-9: Erscheinungsformen von Korrosion .....	31
Abbildung 3-10: Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf verschiedene Foulingmechanismen ..	36
Abbildung 3-11: Entwicklung von Biofilmen mit hypothetischer Toleranzschwelle.....	39
Abbildung 4-1: Feststoffarten in natürlichen Fließgewässern .....	41
Abbildung 4-2: Terminologie für Schwimmstoffe in deutschsprachigen Regelwerken .....	42
Abbildung 4-3: Eintrag von Schwebstoffen aus dem Einzugsgebiet .....	44
Abbildung 4-4: Treibgutansammlung an einem Brückenpfeiler.....	45
Abbildung 4-5: Shields-Diagramm, ergänzt um spätere Messergebnisse verschiedener Autoren.....	48
Abbildung 4-6: Laminare und turbulente Grenzschichtströmung .....	54
Abbildung 5-1: Wärmeübertragungssystem „TwinSheet“ im Strömungskanal .....	56



Abbildung 5-2: a) ADV-Sonde mit Messvolumen und b) Funktionsprinzip .....	64
Abbildung 5-3: Relative Entzugsleistung verschiedener Wärmeübertragersysteme.....	67
Abbildung 5-4: Relative Entzugsleistung verschiedener Wärmeübertragersysteme für $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 4 \text{ K}/Q_{WQA,Ref}$ .....	68
Abbildung 5-5: Vertikale Fließgeschwindigkeiten in [m/s] am „TwinSheet“-Muster.....	69
Abbildung 5-6: „Stegplattenmuster“ und „Spiralmuster“ im Aufwuchsbehälter zur Biofilmbildung.....	72
Abbildung 5-7: Ergebnisse Messreihe 1 „Stegplattenmuster“.....	75
Abbildung 5-8: Ergebnisse Messreihe 2 „Stegplattenmuster“.....	76
Abbildung 5-9: Horizontale Fließgeschwindigkeiten in [m/s] am „Stegplattenmuster“ .....	77
Abbildung 5-10: Ergebnisse Messreihe 1 "Spiralmuster".....	78
Abbildung 5-11: Ergebnisse Messreihe 2 „Spiralmuster“ .....	79
Abbildung 5-12: Horizontale Fließgeschwindigkeiten in [m/s] am "Spiralmuster" .....	80
Abbildung 5-13: Rückstandslose Entfernung des Biofilms unter Einsatz eines Niederdruck- reinigers am Wärmeübertragersystem „Stegplattenmuster“ .....	81
Abbildung 5-14: Qualitativer Temperaturverlauf der Bauformen Gleichstrom und Gegenstrom .....	83
Abbildung 5-15: Abnahme der Wärmedurchgangskoeffizienten bei biologischem Bewuchs ..	85
Abbildung 6-1: Formbeiwerte für verschiedene Rechenstäbe nach Kirschmer .....	89
Abbildung 6-2: Zunahme der Wirbelbildung in Abhängigkeit der lichten Rechenstabweite ...	89
Abbildung 6-3: Geschwindigkeitsvektoren in Abhängigkeit des Anströmwinkels $\delta$ .....	90
Abbildung 6-4: Geschwindigkeitsvektoren bei senkrechter und vertikal geneigter Rechen- ebene.....	91
Abbildung 6-5: Mögliche Gestaltung eines Einlaufschutzes für rechteckige Wärme- übertrager.....	92
Abbildung 6-6: Mögliche Gestaltung eines Einlaufschutzes für kreisförmige Wärme- übertrager.....	93
Abbildung 6-7: Anordnung des Leitrechens im Fließgewässer zum Schutz der Wärmequellenanlage .....	95
Abbildung 6-8: Horizontalstabrechen mit Anströmwinkel $\delta = 70^\circ$ .....	96
Abbildung 6-9: Ausschnitt eines Lochblechrechens .....	97

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Güteklassifizierung nach dem Saprobienindex .....	19
Tabelle 5-1: Produktdaten TwinSheet-Muster .....	66
Tabelle 5-2: Produktdaten Stegplattenmuster .....	70
Tabelle 5-3: Produktdaten Spiralmuster .....	70
Tabelle 5-4: Optische Ablagerungsbildung an den Wärmeübertragungsflächen im zeitlichen Verlauf.....	73

# 1. Einleitung

Der weltweit steigende Energiebedarf stellt eine der grundlegenden Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Die Ursachen der wachsenden Energienachfrage liegen dabei einerseits im starken Anstieg der Weltbevölkerung und andererseits im globalen Wirtschaftswachstum sowie der damit verbundenen Wohlstandssteigerung in den Entwicklungs- und Schwellenländern. Laut einer Pressemitteilung der Internationalen Energieagentur (IEA) ist die weltweite Energienachfrage im Jahr 2018 um 2,3 % gestiegen, wobei es sich um die stärkste Zunahme in der vergangenen Dekade handelt. (IEA 2019, o. S.) Der wachsende Energiebedarf wurde dabei überwiegend durch den Einsatz fossiler Energieträger, wie bspw. Kohle und Erdöl, gedeckt. Zwar konnte auch ein Ausbau der regenerativen Energien verzeichnet werden, jedoch war diese Entwicklung nicht ausreichend, um den zusätzlichen Energiebedarf zu decken. Aufgrund der zusätzlichen Verbrennung fossiler Energieträger fand in der Folge ein weiterer Anstieg der energiebedingten Treibhausgasemissionen statt. Angesichts des fortschreitenden Klimawandels ist jedoch eine langfristige Senkung der Treibhausgasemissionen unumgänglich. Seit Beginn der Industrialisierung hat sich die Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre stark erhöht, was bereits zu einem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von etwa 1 °C geführt hat. (IPCC 2018, S. 51) Um auf lange Sicht den anthropogenen Treibhauseffekt nicht weiter zu verstärken, besteht sowohl von politischer als auch von wissenschaftlicher Seite das Bestreben, die Treibhausgasemissionen erheblich zu senken und eine klimaverträgliche Energieversorgung sicherzustellen. Auf der internationalen Klimakonferenz im Jahr 2015 („COP 21“) wurde dafür das Pariser Abkommen beschlossen, wonach die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Niveau auf deutlich unter 2 °C und möglichst unter 1,5 °C begrenzt werden soll (BMU 2017, o. S.). Der langfristige Entwicklungspfad dieser ambitionierten Klimaschutzziele liegt in der Steigerung von Energieeffizienz und der Nutzung regenerativer Energien.

Doch nicht nur aus Gründen des Klimaschutzes ist die Etablierung einer nachhaltigen Energiewirtschaft erforderlich. Fossile Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas gelten als endliche Rohstoffe, welche nur in begrenztem Umfang verfügbar sind. Zwar umfasst die Schätzung des künftigen Energiebedarfs, auch unter Berücksichtigung des stetigen Zuwachses, nur einen geringen Teil der derzeit ausgewiesenen Rohstoffvorräte. Diese Ressourcen beinhalten jedoch auch die Verfügbarkeit einiger Energieträger, die bislang noch nicht wirtschaftlich erschlossen sind, wie bspw. die Erdölgewinnung aus Ölschiefer. Sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus umweltschutztechnischen Gründen liegt die Zukunft der Energieversorgung daher langfristig

in der Nutzung des nahezu unerschöpflichen Potenzials von regenerativen Energieträgern. Eine der zentralen Herausforderungen liegt dabei in der Entwicklung einer bedarfsgerechten Verfügbarkeit von elektrischer und thermischer Energie. (BGR 2019, S. 86 f.)

Der Endenergieverbrauch in Deutschland kann nach den vier Sektoren „Industrie“, „Verkehr“, „Haushalte“ und „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ unterschieden werden (siehe Abbildung 1-1). Die gesamte Energiemenge setzt sich dabei aus dem Bedarf an elektrischer Energie, thermischer Energie und Kraftstoffen zusammen. Insbesondere im Bereich der privaten Haushalte entfällt der überwiegende Teil des Energiebedarfs auf die Bereitstellung von thermischer Energie in Form von Raumwärme und Warmwasser. Die Raumwärme beansprucht dabei rund drei Viertel der aufgewendeten Energiemenge, wovon ein Großteil durch Wände, Dächer und Fenster entweicht. (BMU 2014, o. S.) Um eine langfristige Senkung des Energiebedarfs in diesem Sektor zu erreichen, ist eine Verbesserung der Energieeffizienz in Form von energetischen Sanierungsmaßnahmen an den Gebäuden von grundlegender Bedeutung.

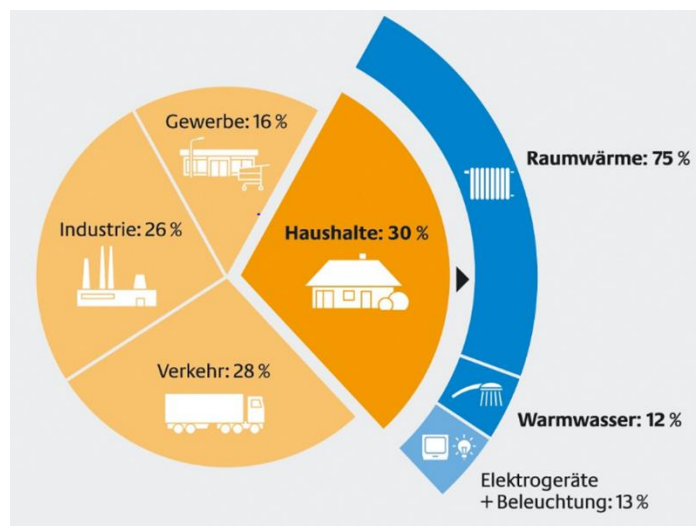


Abbildung 1-1: Endenergieverbrauch in Deutschland (dena 2008, o. S.; Daten BMWI)

Die Deckung des Bedarfs an Heizwärme erfolgt zunehmend durch eine Nutzung von thermischer Energie aus regenerativen Quellen mithilfe von Wärmepumpen. Dabei wird die thermische Energie aus natürlichen Wärmequellen, wie bspw. der Luft, dem Erdreich oder dem Grundwasser, entzogen und durch die Wärmepumpe auf das erforderliche Temperaturniveau zur Beheizung von Gebäuden angehoben. Eine weitere regenerative Energiequelle, welche bislang nur in geringem Maße zur Gewinnung von thermischer Energie genutzt wurde, stellen Fließgewässer dar. Fließgewässer verfügen über ein großes Potenzial an Wärmeenergie, da sie aufgrund

von zahlreichen Einleitungen aus Kraftwerken oder Abwasserbehandlungsanlagen einer laufenden Erwärmung unterzogen werden. (Scholt 1981, S. 178) Die Nutzung von Fließgewässern als Wärmequelle ist jedoch mit einigen Herausforderungen behaftet. Natürliche Fließgewässer unterliegen zahlreichen Einwirkungen aus der Umgebung, wodurch sie sich stets in einem dynamischen Zustand befinden. Durch vielfältige Prozesse werden Feststoffe und chemische Bestandteile aus dem Einzugsgebiet dem Gewässer zugeführt und wirken sich dort grundlegend auf die Eigenschaften und die Beschaffenheit des Fließgewässers aus.

Für den Betrieb und die Ausgestaltung der Wärmequellenanlagen ist insbesondere die Wasserqualität des Fließgewässers von entscheidender Bedeutung. Die Bildung von Ablagerungen an den wärmeübertragenden Flächen kann zu einer Beeinträchtigung der Wärmeentzugsleistung und damit zu einer eingeschränkten Betriebsweise der Anlage führen. Die im Gewässer transportierten Feststoffe können außerdem mechanische Schäden oder Verlegungen an der Wärmequellenanlagen hervorrufen, welche mit aufwendigen Reparatur- und Reinigungsmaßnahmen verbunden sind.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die relevanten Wasserqualitätsparameter ermittelt und deren Auswirkungen auf den Betrieb von Wärmequellenanlagen anhand experimenteller Untersuchungen analysiert. Außerdem werden mögliche Beeinträchtigungen durch die verschiedenen Feststoffarten im Fließgewässer herausgestellt und Gestaltungsempfehlungen für geeignete Schutzmaßnahmen erarbeitet.

Zu Beginn erfolgt eine grundlegende Betrachtung von unterschiedlichen Komponenten der wärmetechnischen Nutzung von Fließgewässern (Kap. 2). Dabei werden der Wärmehaushalt von Fließgewässern und die prinzipielle Funktionsweise von Wärmeübertragern sowie verschiedene Systeme für die Ausführung von Wärmequellenanlagen näher erläutert.

Daran anschließend erfolgt eine Betrachtung der unterschiedlichen Wasserqualitätsparameter eines Fließgewässers sowie der wesentlichen Einflussfaktoren aus der Umgebung. Außerdem werden mögliche Verschmutzungserscheinungen an Wärmeübertragungsflächen sowie deren Einfluss auf die Wärmeübertragung beschrieben. Zudem erfolgt eine Vorstellung geeigneter Maßnahmen zur Reduzierung und Vermeidung dieser Verschmutzungen (Kap. 3).

Für eine Beurteilung der Einflussnahme auf den Betrieb von Wärmequellenanlagen werden die verschiedenen Feststoffarten in Fließgewässern vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eintrags- und Transportprozesse beschrieben (Kap. 4). In diesem Zusammenhang wird auch auf die rechtlichen Grundlagen bei der Entnahme von Rechengut genauer eingegangen. Anschließend erfolgt

eine Betrachtung der potenziellen Auswirkungen von Feststoffen auf den Betrieb von Wärmequellenanlagen in Fließgewässern.

Die Beeinträchtigung der Wärmeentzugsleistung aufgrund von biologischer Bewuchsbildung an den wärmeübertragenden Flächen wurde im Rahmen dieser Arbeit durch experimentelle Untersuchungen am wärmeströmungstechnischen Prüfstand der Technischen Universität Darmstadt beurteilt (Kap. 5). Dafür wurden Messdaten an verschiedenen Wärmeübertragersystemen erfasst und hinsichtlich der Wärmeentzugsleistung analysiert.

Um Wärmequellenanlagen vor mechanischer Schädigung und Verlegung zu schützen, wurden zudem Gestaltungsempfehlungen für konstruktive Schutzmaßnahmen entwickelt (Kap. 6). Bei den theoretischen Überlegungen wurde dabei sowohl nach Form des Anströmungsquerschnitts als auch nach Größe der Anlage differenziert, um die Schutzkonstruktion möglichst effektiv und wirtschaftlich rentabel zu gestalten.

## 2. Wärmetechnische Nutzung von Fließgewässern

Die wärmetechnische Nutzung von Fließgewässern wird von einer Vielzahl verschiedener Faktoren beeinflusst. Eine wesentliche Voraussetzung ist dabei die ausreichende Verfügbarkeit von thermischer Energie im entsprechenden Gewässerabschnitt. Der Entzug der Wärmeenergie aus dem Gewässer erfolgt anhand von Wärmeübertragern, welche entweder direkt in das Fließgewässer eingebracht werden oder durch eine Entnahme von Flusswasser außerhalb des Gewässers betrieben werden. Dieses Kapitel beinhaltet grundlegende Erläuterungen zum Wärmehaushalt von Fließgewässern sowie der Funktionsweise eines Wärmeübertragers. Außerdem werden verschiedene Systeme zur wärmetechnischen Nutzung von Fließgewässern vorgestellt.

### 2.1 Wärmehaushalt von Fließgewässern

Der Wärmehaushalt eines Gewässers gestaltet sich im Allgemeinen durch die Aufnahme von Wärme aus der Atmosphäre, die Verteilung der thermischen Energie im Gewässer und die Abgabe von Wärme an die Atmosphäre. Die Wärmeaufnahme erfolgt überwiegend durch die Absorption von Strahlungsenergie der Sonne in den oberen Schichten des Wasserkörpers. Durch Vermischungsprozesse wird die aufgenommene Wärmeenergie in die tiefer liegenden Schichten verteilt. Infolge von Ausstrahlung, Verdunstung und Wärmeleitung findet ein Wärmeübergang von dem Gewässer an die Umgebung statt. (Schwoerbel und Brendelberger 2013, S. 42)

Aus ökologischer Sicht stellt die hohe spezifische Wärmekapazität eine besonders wichtige thermische Eigenschaft von Wasser dar. Sie beträgt für flüssiges Wasser bei 15 °C definitionsgemäß 4,186 kJ/(kg·K) und beschreibt damit die erforderliche Wärmemenge, die aufgewendet werden muss, um 1 kg Wasser um 1 °C zu erwärmen (Schwoerbel und Brendelberger 2013, S. 35). Aufgrund seiner hohen spezifischen Wärmekapazität besitzt Wasser ein erhebliches Potenzial zur Speicherung von Wärmeenergie. Gewässer verfügen daher über ein Ausgleichsvermögen in Bezug auf tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen und bieten ausgewogene Lebensraumbedingungen für die darin lebenden Organismen. Für den Wärmehaushalt von Fließgewässern ist außerdem die geringe Wärmeleitfähigkeit des Wassers von Bedeutung. Sie beschreibt das Vermögen, thermische Energie durch konduktive Prozesse zu transportieren und ist temperaturabhängig. Die Wärmeleitfähigkeit für Wasser beträgt  $\lambda_{\text{Wasser}, 25^\circ\text{C}} = 0,569 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  bei 25 °C. (Lange und Lecher 1993, S. 19) Als Vergleichswert dient die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer mit  $\lambda_{\text{Kupfer}, 0^\circ\text{C}} = 401 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  (VDI 2013, S. 629). Der Wärmetransport in Wasser findet aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit daher überwiegend konvektiv statt.

Der Wärmehaushalt eines Fließgewässers basiert zum einen auf den Eigenschaften des fließenden Wassers selbst, wie den geometrischen Ausmaßen des Wasserkörpers (durchschnittliche Tiefe  $h$ ), der Dichte  $\rho$  und der spezifischen Wärmekapazität  $c$ , zum anderen auf verschiedenen Einflussfaktoren aus der Umgebung, wie direkte Sonnenstrahlung ( $S$ ), diffuse Himmelsstrahlung ( $D$ ), effektive Ausstrahlung ( $E$ ), der Verdunstungs- bzw. Kondensationswärme ( $V$ ) sowie dem Wärmeaustausch mit Luft ( $L$ ) und Boden ( $B$ ). Eine ausführliche Erläuterung der genannten Einwirkungen ist in den Ausführungen von Eckel und Reuter (1950, S. 189-196) zu finden. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang zur Änderung der Wassertemperatur in Abhängigkeit der Zeit (Eckel und Reuter 1950, S. 196):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{h \cdot \rho \cdot c} (S + D - E \pm V \pm L \pm B) \quad (2.1)$$

Neben diesen grundsätzlich stattfindenden Einwirkungsfaktoren aus der Atmosphäre wird der natürliche Wärmehaushalt von Fließgewässern zusätzlich von lokalen Gegebenheiten wie Topografie, Abflussbedingungen und dem Gewässerbett geprägt (Caissie 2006, S. 1390 f.) In Abbildung 2-1 ist ein Überblick über diese weiteren natürlichen Einflussgrößen gegeben. Obwohl den Wechselwirkungen mit der Atmosphäre die größte Bedeutung zukommt, ist der Wärmeaustausch durch die übrigen Faktoren bei einer ganzheitlichen Betrachtung nicht zu vernachlässigen. So schützt beispielsweise eine dichte und umfangreiche Ufervegetation durch Verschattungseffekte vor direkter Sonneneinstrahlung. Außerdem kann infolge des Zustroms von unterirdischem Grundwasser eine Kühlung des Gewässers stattfinden. (LfU 2018, o. S.)

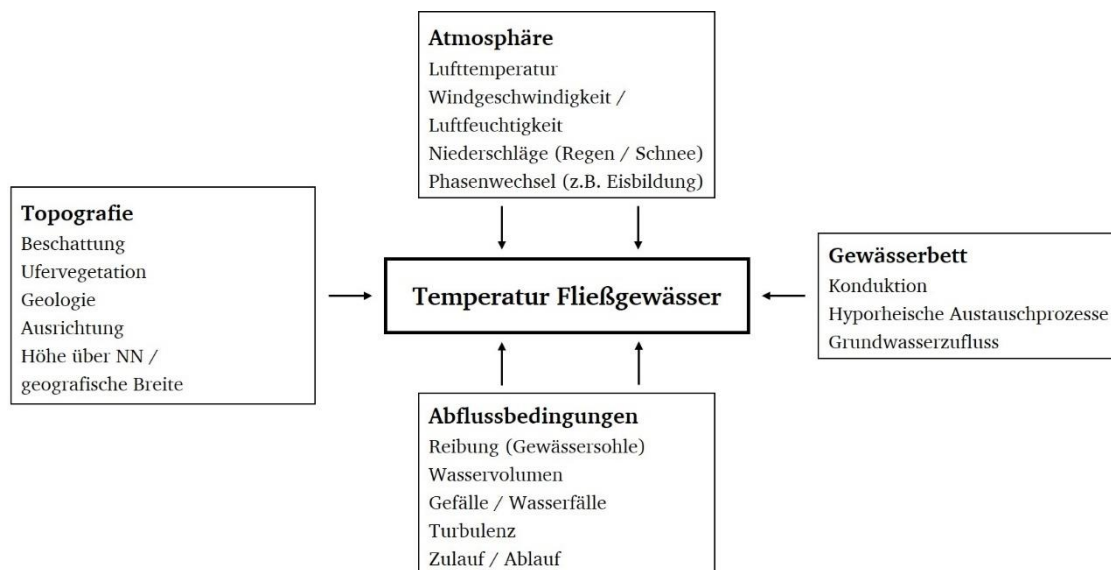


Abbildung 2-1: Natürliche Einflussfaktoren auf die Temperaturverhältnisse in Fließgewässern  
(verändert nach Caissie 2006, S. 1391)



Entlang des Fließgewässers treten aufgrund des Wärmeaustauschs mit Luft und Boden tages- und jahreszeitliche Schwankungen der Wassertemperatur auf. Diese werden maßgeblich durch die Differenz zwischen Quelltemperatur und Lufttemperatur sowie die Geometrie und das Volumen des Wasserkörpers beeinflusst. Insbesondere die sommerlichen Temperaturschwankungen eines Tages sind demnach umso größer, je geringer das abfließende Wasservolumen bzw. die Wassertiefe und je größer die Differenz zwischen Quellwasser- und Lufttemperatur ist. Die Quelltemperaturen entsprechen annähernd der mittleren Lufttemperatur eines Jahres in der jeweiligen geographischen Breite und Höhenlage. Mit zunehmendem Abstand zur Quelle nimmt die gesamte Wärmemenge eines Fließgewässers stromabwärts im Sommer zu, im Winter durch eine Abgabe an die Umgebung dagegen wieder ab. Gleichzeitig werden diese thermischen Prozesse von den tageszyklischen Temperaturschwankungen überlagert. Eine ausgeglichene Wärmebilanz, welche ausschließlich auf Aus- und Einstrahlung beruht, stellt sich erst außerhalb des Einwirkungsbereichs der Quelltemperaturen ein. (Lange und Lecher 1993, S. 20) In Abbildung 2-2 sind die charakteristischen Jahresganglinien der Wassertemperaturen anhand der Monatsmittelwerte für einen Gebirgsfluss und einen Flachlandfluss dargestellt. Demnach treten die höchsten Wassertemperaturen im Zeitraum von Ende Juli bis Anfang August mit leichter Verzögerung hinter der maximalen Lufttemperatur auf. Die niedrigsten Temperaturwerte werden im Januar und Februar erreicht und entsprechen hier annähernd den Lufttemperaturen. Insgesamt fällt die Temperaturamplitude des Gebirgsflusses verglichen mit der Lufttemperatur geringer aus, wogegen im Flachlandfluss die Extremwerte der Wassertemperatur stärker vom Mittelwert abweichen als die der Lufttemperatur. (Täubert 1974, S. 26)

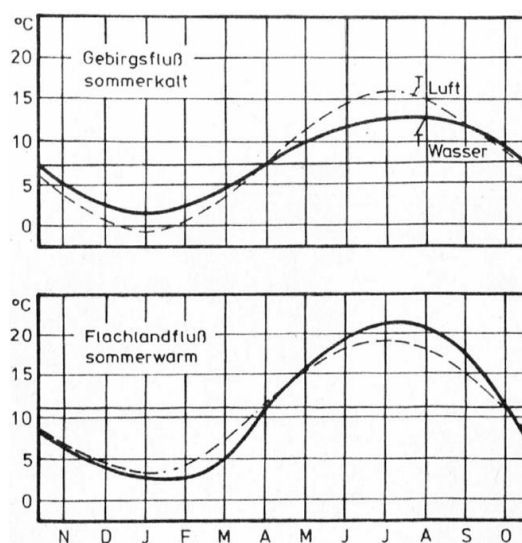


Abbildung 2-2: Charakteristische Jahresganglinien der Flusswassertemperaturen und Lufttemperaturen (LAWA 1991, S. 39, verändert nach Täubert 1974, S. 25)

Die Temperaturbedingungen für jeden beliebigen Punkt eines Fließgewässers basieren auf den allgemein geltenden thermischen Verhältnissen in einer fließenden Welle. Zu den wichtigsten Tatsachen gehört dabei, dass an der Quelle selbst weitestgehend konstante Temperaturwerte vorliegen und zwischen den mittleren Luft- und Wassertemperaturen ein Korrelationszusammenhang besteht. Damit steigt die Jahresamplitude der Temperatur im Verlauf flussabwärts an. Auch die Tagesamplituden nehmen quellabwärts zunächst zu, fallen dann aber wieder ab, da hier die große Differenz zwischen Quellwasser- und Lufttemperatur der flussabwärts zunehmenden Wassermasse entgegenwirkt. Mit zunehmender Entfernung zur Quelle steigt außerdem die mittlere Wassertemperatur im Sommer an, die Temperaturveränderungen je Streckeneinheit werden geringer und die Länge von Flussabschnitten mit nahezu gleicher Temperatur nimmt zu. (Schwoerbel und Brendelberger 2013, S. 47 f.)

Die Wassertemperatur ist ein zentraler Parameter der Gewässergüte, da sie für eine Vielzahl biologischer und physikalisch-chemischer Prozesse in Gewässern verantwortlich ist. Sie bestimmt die Geschwindigkeit des Stoffwechsels im Gewässer und beeinflusst damit unmittelbar die Zusammensetzung und den Gesundheitszustand der aquatischen Biozönose. Zudem wirkt sie sich auf die Photosyntheseleistung, gewässerinterne Stoffumsatzraten, die Löslichkeit von Gasen sowie die Toxizität von Umweltchemikalien aus. (LfU 2013, S. 2) In den vergangenen Jahrzehnten hat jedoch eine Veränderung der jährlichen mittleren und maximalen Wassertemperaturen stattgefunden. Verschiedene Langzeitstudien belegen europaweit einen deutlichen Trend zur Erhöhung der Temperaturen von Fließgewässern (vgl. Haag 2009, Tab. 3.1, S. 12). Die Ursache dieser Veränderungen ist größtenteils durch die Auswirkungen des Klimawandels begründet, da eine Zunahme der mittleren Lufttemperatur auch ein Anstieg der Gewässertemperaturen zur Folge hat. Zunehmend auftretende Extremwetterereignisse wie Hitzewellen und anhaltende Trockenperioden führen zu niedrigen Wasserständen, wodurch der Erwärmungseffekt verstärkt wird. Zusätzlich wirken punktuelle anthropogene Eingriffe direkt an den Gewässern oder in deren Umfeld verstärkend auf den Anstieg der Wassertemperaturen. So findet durch die Zufuhr von Abwärme aus Kraftwerken, Industrie und Kläranlagen ein zusätzlicher Wärmeeintrag in Fließgewässer statt, welcher sich insbesondere auf die Biozönose des lokalen Fließquerschnitts auswirkt. Außerdem tragen Stauregulierungen, Wasserentzug und Abflussverringerungen sowie der Verlust natürlicher Beschattung durch Abholzungen und Rodung zum weiteren Anstieg der Fließgewässertemperaturen bei. (Reinartz 2007, S. 63) Mögliche Auswirkungen auf die Gewässerökologie infolge der erhöhten Wassertemperaturen sind die eingeschränkte biochemische und physiologische Aktivität der im Gewässer lebenden Organismen,

eine Veränderung der Artenzusammensetzung sowie die Begünstigung eines übermäßigen Wasserpflanzen- und Algenwachstums (LfU 2018, o. S.).

Eine thermische Nutzung von Fließgewässern durch den Entzug von Wärme mithilfe von Wärmeübertragern besitzt demnach nicht nur das Potenzial zur Bereitstellung von Heizenergie für Gebäude, sondern bietet auch eine Möglichkeit der anthropogen verursachten Gewässererwärmung entgegenzuwirken. Aufgrund des hohen Wärmeaufkommens in Fließgewässern ist dort eine negative Beeinflussung der Gewässergüte durch die resultierenden Abkühlungsprozesse einer Wärmepumpe daher nicht zu erwarten (Wunderlich 1979, S. 193 f.).

## 2.2 Funktionsprinzip eines Wärmeübertragers

Wärmeübertrager sind kompakte technische Bauteile, welche dazu dienen, thermische Energie in Form von Wärme von einem Medium auf ein anderes zu übertragen. Diese Apparate werden in nahezu allen technischen Bereichen eingesetzt, wodurch eine Vielzahl verschiedener Ausführungsformen existiert. Das Funktionsprinzip eines Wärmeübertragers basiert auf thermodynamischen Grundlagen und Gesetzen, insbesondere dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Demnach geht Wärme stets von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper niedrigerer Temperatur über. Dieser Vorgang läuft spontan ab und ist irreversibel. (Langeheinecke et al. 2017, S. 123) In einem Wärmeübertrager wird dieser Prozess von verschiedensten Faktoren beeinflusst. Neben den Ausgangstemperaturen der Stoffströme spielen dabei auch geometrische Anordnung und Abmessungen des Apparats sowie Massenströme, Stoffeigenschaften und die im Inneren auftretenden Strömungsformen eine entscheidende Rolle. Als Arbeitsmedien kommen in Wärmeübertragern vorwiegend Flüssigkeiten oder Gase zum Einsatz. Dabei kann es je nach eingesetzten Medien sowie in Abhängigkeit der Ausführungsform des Apparats auch zu einer Änderung des Aggregatzustandes der beteiligten Fluide kommen. (Marek und Nitsche 2015, S. 216) Die eingesetzten Stoffströme zur Wärmeübertragung stehen dabei meist nicht in direktem Kontakt, sondern sind durch eine feste Wandung räumlich voneinander getrennt. Dieser Prozess wird als indirekte Wärmeübertragung bezeichnet. Bei Systemen mit direkter Wärmeübertragung findet dagegen ein Stoffübergang zwischen den unterschiedlich temperierten Fluiden durch unmittelbare Berührung bzw. Durchmischung statt. (Langeheinecke et al. 2017, S. 385 f.) Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit sind jedoch ausschließlich die Prozesse der indirekten Wärmeübertragung von Interesse. Bei der Ausführungsart ist dabei nach Rekuperatoren und Regeneratoren zu unterscheiden. Ein Rekuperator wird zeitgleich von den

beiden räumlich voneinander getrennten Fluiden stationär durchströmt, wodurch ein kontinuierlicher Wärmeaustausch erzeugt wird. In Regeneratoren ist dagegen eine Speichermasse enthalten, welche von den beteiligten Fluiden im zeitlichen Wechsel durchströmt und somit erwärmt bzw. abgekühlt wird. Der Wärmeaustausch in Regeneratoren erfolgt demnach diskontinuierlich. (Marek und Nitsche 2015, S. 217)

Abbildung 2-3 zeigt die schematische Darstellung eines Wärmeübertragers mit den wichtigsten Bezeichnungen der beiden Stoffströme. Das Fluid 1 wird mit der Temperatur  $\vartheta_1'$  in den Wärmeübertrager eingebracht und entweicht anschließend mit der Temperatur  $\vartheta_1''$ . Das Fluid 2 besitzt beim Einlauf in den Wärmeübertrager die Temperatur  $\vartheta_2'$  und verlässt diesen mit der Temperatur  $\vartheta_2''$ .

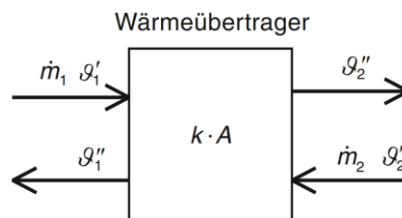


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung eines Wärmeübertragers (Böckh und Wetzel 2017, S. 254)

Die Wärmeübertragung des wärmeren Fluids auf das kältere Fluid durch die Trennwand wird maßgeblich durch den Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  sowie die Wärmeübertragungsfläche  $A$  bestimmt. In Abhängigkeit der mittleren Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_m$  zwischen den beiden Arbeitsmedien ist der Wärmestrom zwischen den beiden Fluiden folgendermaßen definiert (Böckh und Wetzel 2017, S. 254):

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m \quad (2.2)$$

Um möglichst viel Wärme pro Flächeneinheit zu übertragen und damit einen optimalen Wirkungsgrad des Wärmeübertragers zu erzielen, sind nach Gl. (2.2) hohe Werte für  $\Delta\vartheta_m$  und  $k$  erforderlich. Die mittlere Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_m$  ist maßgeblich von der geometrischen Führung der beiden Stoffströme relativ zueinander abhängig (Slipcević 1988, S. 70). Dabei ist nach drei Grundformen der Strömungsführung zu unterscheiden (siehe Abbildung 2-4). Bei der Gleichstromführung treten beide Fluide an derselben Position in den Wärmeübertrager ein und durchströmen den Apparat nebeneinander in die gleiche Richtung. In einem Gegenstromwärmeübertrager fließen die Stoffströme gegenläufig aneinander vorbei, wobei die Eintrittsposition von Fluid 1 der Austrittsposition von Fluid 2 entspricht. Die dritte Form der Strömungsführung

wird als Kreuzstrom bezeichnet, da die Strömung der beiden Fluide senkrecht zueinander erfolgt. Diese Ausführung liegt somit zwischen der Gleichstrom- und der Gegenstromführung. Außerdem existieren beliebige Kombinationen der beschriebenen Grundformen. Je nach Anwendungsbereich kommen dabei unterschiedliche technische Bauarten, wie beispielsweise Rohrbündel-, Platten-, Spiral- und Rotations-Wärmeübertrager zum Einsatz. (Marek und Nitsche 2015, S. 219-221)

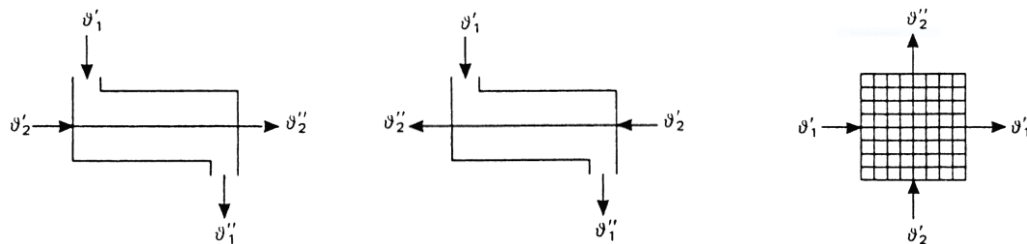


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Bauarten von Wärmeübertragern (links: Gleichstrom, Mitte: Gegenstrom, rechts: Kreuzstrom) (VDI 2013, S. 58 f., S. 65)

Hohe mittlere Temperaturdifferenzen für einen leistungsstarken Betrieb des Wärmeübertragers werden besonders bei der Gegenstromführung erreicht. Die Gleichstromführung stellt hinsichtlich der thermischen Leistung dagegen eine weniger günstige Strömungsführung dar. (VDI 2013, S. 43) Verglichen mit dem Gegenstrom ist dementsprechend bei gleichen Betriebsbedingungen und Wärmedurchgangskoeffizienten bei der Gleichstromführung die erforderliche Wärmeübertragungsfläche um ein Vielfaches größer (Slipcević 1988, S. 71). Des Weiteren sind für eine Optimierung des Wärmedurchgangskoeffizienten auftretende Hemmnisse wie fluidseitige Wärmeübergangswiderstände oder Verschmutzungsschichten auf den wärmeübertragenden Flächen bestmöglich zu vermeiden (Langeheinecke et al. 2017, S. 388). Diese Verschmutzungen an den Trennwänden treten im Betrieb von Wärmeübertragern in Form von Ablagerungen auf und setzen auf diese Weise den Wirkungsgrad des Wärmeübertragers herab. Dieser Prozess wird auch als Fouling bezeichnet und in Kap. 3.2 näher erläutert.

## 2.3 Systeme zur wärmetechnischen Nutzung von Fließgewässern

Die wärmetechnische Nutzung von Fließgewässern kann grundsätzlich in zwei verschiedene Systeme unterschieden werden, das offene und das geschlossene System. Bei einem offenen System wird Wasser aus dem Fließgewässer entnommen und über den Verdampfer einer Wärmepumpe geleitet. An dieser Stelle findet der Wärmeübertrag zwischen Flusswasser und dem Kältemittelkreislauf der Wärmepumpe statt. Das abgekühlte Wasser wird anschließend dem

Gewässer wieder zugeführt (siehe Abbildung 2-5). (Spitler und Mitchell 2016, S. 225) Aufgrund des direkten Kontakts des Flusswassers mit dem Verdampfer der Wärmepumpe treten bei der Wärmeübertragung nur geringe Energieverluste auf. Offene Systeme zeichnen sich demnach durch ihre hohe Effizienz beim Wärmeentzug aus. Um jedoch eine übermäßige Verunreinigung der Anlagenteile durch Wasserinhaltsstoffe zu vermeiden, ist eine entsprechend hohe Qualität bzw. eine Aufbereitung des genutzten Flusswassers erforderlich. (Spitler und Mitchell 2016, S. 232 f.)

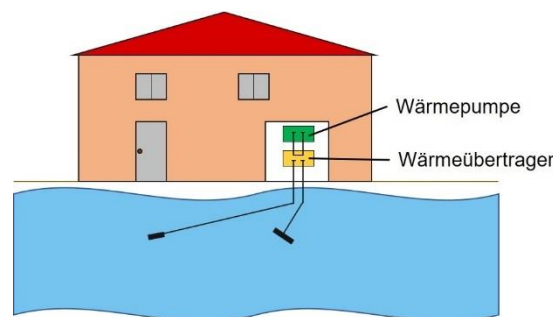


Abbildung 2-5: Wärmequellenanlage im offenen System (eigene Darstellung nach Raymond et al. 2007, S. 281)

Bei einem geschlossenen System findet der Entzug thermischer Energie direkt im Fließgewässer statt. Dafür wird der Wärmepumpe und dem Fließgewässer ein Wärmeübertrager zwischengeschaltet und in den Wasserkörper eingebracht (siehe Abbildung 2-6). Als zirkulierendes Wärmeträgermedium im Zwischenkreislauf kann anstelle von Wasser auch eine Sole eingesetzt werden. Diese besteht meist aus einem Gemisch aus Wasser mit einem Frostschutzmittel und ermöglicht somit eine thermische Nutzung des Gewässers auch bei niedrigen Wassertemperaturen. (Chen und Zhang 2014, S. 3) Aufgrund der geringen Anfälligkeit des Zwischenkreislaufs gegenüber Verschmutzungen kann der Wärmeübertrager zudem auch bei schlechter Wasserqualität ohne Aufbereitungsmaßnahmen in das Gewässer eingesetzt werden. Durch das direkte Einbringen von Anlagenteilen in den Wasserkörper, die zudem wassergefährdende Stoffe in Form des Frostschutzmittels enthalten, ist jedoch Sorge zu tragen, dass keine negativen Beeinträchtigungen des Gewässers bspw. durch Leckagen auftreten (vgl. § 62 WHG). Bei der Ausführung eines geschlossenen Systems besteht bei geringen Gewässertemperaturen zudem die Gefahr einer Vereisung des Wärmeübertragers. Durch die Bildung einer Eisschicht an den wärmeübertragenden Oberflächen kommt es zu einer Erhöhung des thermischen Widerstandes und es treten Leistungsverluste auf. Zudem können aufgrund der Vereisung Auftriebserscheinungen entstehen, welche zusätzliche Beeinträchtigungen des Betriebs verursachen. (Spitler und Mitchell 2016, S. 241)

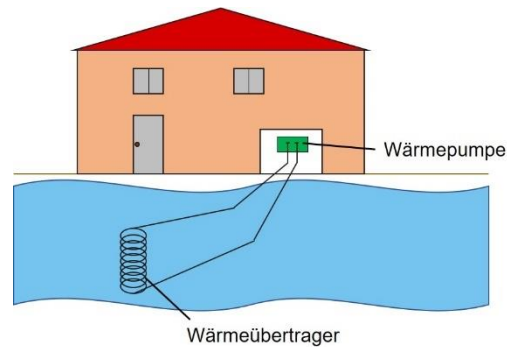


Abbildung 2-6: Wärmequellenanlage im geschlossenen System (eigene Darstellung nach Raymond et al. 2007, S. 281)

Die Wahl zwischen einem offenen und einem geschlossenen System hängt somit zum einen von der Wasserqualität und dem Jahrestemperaturverlauf des entsprechenden Fließgewässers ab. Zum anderen ist auch die Betriebsweise der Anlage, also eine monovalente oder bivalente Nutzung, bei der Ausführung zu berücksichtigen. Grundsätzlich ist ein monovalenter Betrieb zu bevorzugen, jedoch besteht oftmals bei zu geringen Flusstemperaturen die Gefahr von Vereisung, wodurch eine zusätzliche Wärmequelle und somit ein bivalenter Betrieb erforderlich wird. Darüber hinaus sind die räumlichen Gegebenheiten, der Heizbedarf sowie genehmigungsrechtliche Voraussetzungen bei der Entscheidung einzubeziehen (Scholt 1981, S. 178).

Für größere Anlagen besteht zudem die Möglichkeit eines gesplitteten Systems, bei welchem die einzelnen Komponenten der Wärmepumpenanlage separiert vorliegen. Der Verdampfer wird dabei direkt in den Flusslauf oder in einen abgezweigten Kanal eingebracht (siehe Abbildung 2-7). Zum Schutz des Verdampfers kann am Einlauf des Kanals eine Regulierung wechselnder Wasserstände sowie die Rückhaltung von Feststoffen vorgenommen werden.

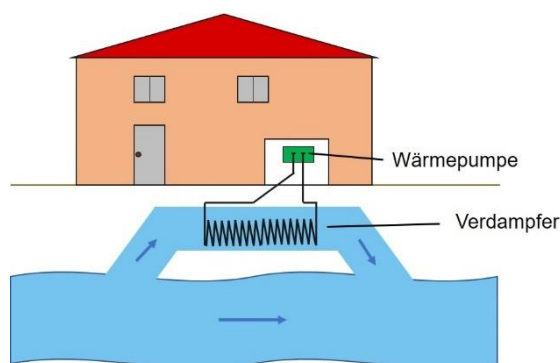


Abbildung 2-7: Wärmequellenanlage als gesplittetes System (eigene Darstellung)

Ähnlich dem offenen System erweist sich auch hier der Wärmeentzug als äußerst effizient, da der Verdampfer im direkten Kontakt mit dem Flusswasser steht. Jedoch ist gleichermaßen dem



geschlossenen System sicher zu stellen, dass keine wassergefährdenden Stoffe aus dem Wärmepumpenkreislauf in das Fließgewässer gelangen. (Borchardt 2018b, S. 23) Für die Ausführungen in den nachfolgenden Kapiteln liegt der Schwerpunkt auf der Anwendung geschlossener Systeme. Auch die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich an geschlossenen Wärmeübertragersystemen durchgeführt.



### 3. Wasserqualität und relevante Einflussgrößen

Die Wasserqualität stellt einen wesentlichen Einflussfaktor für die wärmetechnische Nutzung von Fließgewässern dar. Insbesondere ein hoher Anteil an Mikroorganismen und Nährstoffen kann zu biologischem Bewuchs an den wasserumströmten Bauteilen des Wärmeübertragers führen und somit dessen Entzugsleistung deutlich verringern. Des Weiteren ist eine Schädigung der Werkstoffe aufgrund von korrosionsfördernden Stoffen im Wasser möglich. Dies hat eine eingeschränkte Nutzung der Anlage in Verbindung mit erhöhten Kosten für Reparatur- und Wartungsarbeiten zur Folge und kann bis hin zu einem Betriebsausfall der Anlage führen.

In diesem Kapitel werden relevante Wasserqualitätsparameter und die Gewässergüteklassifizierung für Fließgewässer in Deutschland aufgezeigt sowie die Auswirkungen der Wasserqualität auf die Wärmeübertragung und auf die eingesetzten Werkstoffe näher betrachtet.

#### 3.1 Beschaffenheit und Güteklassifizierung oberirdischer Fließgewässer

Die stoffliche Zusammensetzung natürlicher Fließgewässer resultiert grundsätzlich aus vielfältigen Wechselwirkungen des Wassers mit seiner Umgebung. Zu den wesentlichen Einflussfaktoren gehören dabei das angrenzende Gestein, die Atmosphäre sowie die vorliegenden Ökosysteme. Die Verweildauer des Wassers in einem Abflussgerinne ist aufgrund der Fließbewegung sehr kurz und beträgt weltweit im Mittel nur knapp 10 Tage. Die natürliche Zusammensetzung und der Stoffhaushalt von Fließgewässern sind demnach stark durch die zeitliche Begrenzung der chemischen Prozesse geprägt. Während der Chemismus stehender Gewässer überwiegend auf internen Stoffwechselvorgängen basiert, sind fließende Gewässer hinsichtlich ihrer chemischen Fracht dagegen in erster Linie als Transportsysteme anzusehen. (Lange und Lecher 1993, S. 24 f.) Trotz der begrenzten Aufenthaltszeit laufen in Fließgewässern dennoch zahlreiche chemische Vorgänge ab, welche die Eigenschaften des Gewässers beeinflussen. Als grundlegende Prozesse sind dabei Verwitterungs- und Lösungsvorgänge, Verdunstung und Ausfällung, Adsorption und Desorption an Schwebstoffen und Geschiebe, biologische Stoffumsätze der aquatischen Fauna sowie der Austausch mit Atmosphäre und Gewässersohle zu nennen (Meyer et al. 1988, S. 411 f.). Diese Abläufe sind in Abhängigkeit der klimatischen Bedingungen sowie der geologischen Struktur des Einzugsgebiets unterschiedlich stark ausgeprägt und bilden den chemischen Charakter des Gewässers. Mit zunehmender Laufentwicklung repräsentieren Fließgewässer demnach die lokalen ökologischen Strukturen und spiegeln die geochemischen Verhältnisse ihres Einzugsgebiets wider. (Lange und Lecher 1993, S. 25)

Die chemische Zusammensetzung natürlicher Oberflächengewässer ist üblicherweise durch anorganische gelöste Feststoffen, wie z. B. die sogenannten Hauptionen und Spurenmetalle, sowie gelöste Gase und Nährstoffe bestimmt. Die typischen Konzentrationsbereiche dieser Bestandteile in See- oder Flusswasser sind in Abbildung 3-1 dargestellt. Zwar wird die Zusammensetzung der Hauptionen von den unterschiedlichen geochemischen Gegebenheiten beeinflusst, die meisten natürlichen Gewässer sind jedoch bezüglich ihrer Stoffkonzentrationen sehr ähnlich. Verschiedene Reaktionen zwischen Gestein, Wasser und  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre tragen außerdem zu einer Pufferung des pH-Wertes bei, welcher für natürliche Süßwässer meist im Bereich von 6,5-8,5 liegt. (Sigg und Stumm 2011, S. 28)

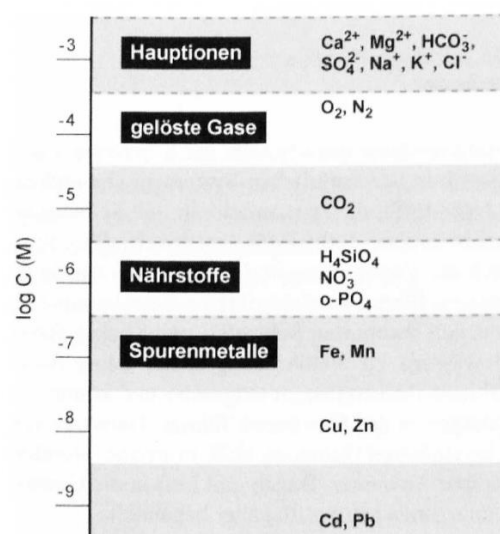


Abbildung 3-1: Konzentrationsbereiche der chemischen Bestandteile in typischen Süßwässern (Sigg und Stumm 2011, S. 28)

Neben den gelösten anorganischen Feststoffen liegen auch organische Verbindungen in natürlichen Gewässern vor. Diese werden entweder aus dem Einzugsgebiet durch Abschwemmungen und Bodensickerwasser eingetragen oder entstammen dem mikrobiellen Abbau organischer Überreste im Gewässer sowie der Exkretion aquatischer Organismen. Die Konzentration der organischen Verbindungen ist in Fließgewässern gegenüber der anorganischen gelösten Stoffe meist um ein Vielfaches höher. (Lange und Lecher 1993, S. 29)

Neben den natürlichen Einflussfaktoren unterliegt die Wasserbeschaffenheit von Fließgewässern auch vielfach anthropogenen Einwirkungen. Besonders in ausgeprägten Kulturlandschaften bestehen im Grunde keine natürlichen Verhältnisse mehr. Aufgrund von Eingriffen in naturräumliche Gegebenheiten und stofflichen Belastungen wurden die Fließgewässer dort teilweise erheblichen Veränderungen unterzogen. Doch auch Bereiche, welche noch als naturnah

angesehen werden können, sind nicht ganz frei von anthropogenen Einwirkungen, da sie beispielsweise durch Stoffeinträge aus der Atmosphäre oder die Klimaerwärmung beeinflusst werden. (DWA 2017, S. 18) Für eine differenziertere Betrachtung kann bei der Zufuhr von stofflichen Belastungen nach diffusen und punktförmigen Quellen unterschieden werden. Als diffuse Einträge werden demnach Belastungen angesehen, welche nicht einer eindeutigen Quelle zuzuordnen sind und über den natürlichen hydrologischen Kreislauf den Gewässern zugeführt werden. Dabei handelt es sich beispielsweise um Abschwemmungen aus landwirtschaftlich genutzten Böden, Siedlungsflächen, Deponien und Altlasten sowie atmosphärische Deposition. Punktförmige Quellen sind dagegen räumlich begrenzte und konzentrierte Einleitungen, deren Herkunft eindeutig identifizierbar ist. Als wesentliche Beispiele dafür sind Kläranlagenabflüsse und Regenwassereinleitungen sowie die Zufuhr industrieller Abwässer zu nennen. (DVWK 1998, S. 3 f.)

In Abhängigkeit der eingeleiteten Stoffkonzentrationen sowie der Gewässergröße können diese anthropogenen Belastungen zu erheblichen Veränderungen im Stoffhaushalt der Fließgewässer führen und damit einen entscheidenden Einfluss auf die Wasserqualität ausüben. Mit den Kläranlagenabflüssen werden hauptsächlich Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor, aber auch Metalle und organische Schadstoffe den Fließgewässern zugeführt. Die Abschwemmungen von landwirtschaftlichen Nutzflächen verstärken den anthropogenen Eintrag von Nährstoffen ebenfalls. (Sigg und Stumm 2011, S. 442 f.) In dessen Folge kommt es sowohl im Fließgewässer als auch in stromabwärts gelegenen Seen und Küstengebieten zu einer Eutrophierung. Infolge der Nährstoffüberschüsse zeichnet sich diese durch eine übermäßige Zunahme der Pflanzenbiomasse aus. Daraus resultieren neben der Verkrautung und Veralgung des Gewässers auch Beeinträchtigungen des Sauerstoffhaushaltes sowie Einwirkungen auf die Artenzusammensetzung und die lokale Fließgewässerfauna. (DVWK 1998, S. 20 f.) Des Weiteren kommt es durch die Einträge von organischem Kohlenstoff aus ungeklärten oder ungenügend gereinigten Abwässern zu einer Sauerstoffzehrung im Fließgewässer. Auch beim Vorgang der Nitrifikation, also der Umwandlung von Ammonium in Nitrat, wird dem Gewässer Sauerstoff entzogen. Das aus Abwässern stammende Ammonium hat zudem eine toxische Wirkung auf Fische. Auch Schwermetalle wie Kupfer, Zink, Blei, Cadmium und Quecksilber mit Herkunft aus industriellen Einleitungen und Abschwemmungen von Siedlungsflächen wirken toxisch auf aquatische Organismen. Zudem gelangen zahlreiche Schadstoffe in Form von synthetischen organischen Verbindungen, wie bspw. Pestizide, Reinigungsmittel, Pharmazeutika etc., in die Gewässer und kön-

nen dort durch Akkumulation in Organismen ebenfalls toxische Wirkungen entfalten. Die Vielfalt und Konzentration anthropogener Belastungen nimmt üblicherweise entlang eines Flusslaufs mit steigender Anzahl von Eintragsquellen zu. (Sigg und Stumm 2011, S. 443)

Das Selbstreinigungsvermögen vieler Fließgewässer wurde aufgrund der zahlreichen anthropogenen Einwirkungen in den vergangenen Jahren erheblich überschritten. Um die Voraussetzungen für ein naturnahes Fließgewässer wiederherstellen zu können, ist eine Kenntnis der gegenwärtigen Gewässergüte sowie der naturraumtypischen Bedingungen erforderlich. Mit der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) wurde ein Rahmen zum Schutz und zur Verbesserung des Zustandes aquatischer Ökosysteme sowie zu einer nachhaltigen Nutzung der Gewässer geschaffen. Neben der Gewässergüte bildet dabei auch die Gewässerstruktur eine wichtige Qualitätskomponente. Diese ist jedoch für den weiteren Verlauf dieser Arbeit nur von geringfügiger Relevanz, weshalb an dieser Stelle darauf nicht näher eingegangen wird.

Die Faktoren zur Beurteilung der Gewässergüte können nach chemisch-physikalischen und biologischen Parametern unterschieden werden. Bei den chemisch-physikalischen Parametern handelt es sich um Grundwerte, wie z. B. Wassertemperatur, pH-Wert und Sauerstoffgehalt, aber auch Pflanzennährstoffe, Spurenelemente und toxische Stoffe (vgl. Patt 2018, Tab. 5.1). Der Fokus liegt dabei auf der Erfassung der Gewässerbelastung durch einzelne Stoffe oder auch Schadstoffgruppen. Diese sind in der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) für verschiedene Gewässertypen aufgeführt und hinsichtlich ihrer Konzentration beurteilt. Die biologischen Kriterien der Gewässergüte werden mithilfe verschiedener Verfahren identifiziert. Zum einen werden dafür die Gewässer selbst in Hinblick auf die vorhandenen Biozönosen analysiert, zum anderen werden Wasserproben auf ihre natürliche Bioaktivität oder deren Wirkung auf Testorganismen hin untersucht. Die größte Bedeutung bei der Bewertung der biologischen Gewässergüte kommt dem Saprobienindex zu. Dabei werden die Gewässer auf bestimmte Indikatororganismen, sogenannte Saprobien, hin untersucht. Saprobien sind auf ein eng begrenztes Spektrum der Wasserqualität angewiesen und ermöglichen durch ihr Vorhandensein Rückschlüsse auf die biologische Gewässergüte. (Patt 2018, S. 185 f.) Dieses bioökologische Verfahren ist in DIN 38410 geregelt und bietet seit 1991 die Grundlage für die Bewertung und Klassifizierung der Gewässergüte in Deutschland. Zur Ergänzung der biologischen Untersuchungen werden zudem auch chemisch-physikalische Parameter in die Bewertung miteinbezogen. Da der mikrobielle Abbau der aus Abwässern entstammenden organischen Substanzen unter starker Sauerstoffzehrung erfolgt, wird der biochemische Sauerstoffbedarf BSB<sub>5</sub> als Maß für den Gehalt an leicht abbaubaren organischen Verbindungen beurteilt. Aufgrund seiner zum Teil toxischen

Wirkung ist auch die Menge an Ammonium-Nitrat ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) ein wichtiges Gewässergütekriterium. Auch die Sauerstoffminima werden infolge ihrer limitierenden Wirkung auf den Lebensraum von aquatischen Organismen bei der Beurteilung der Wasserqualität hinzugezogen. Die Gewässergüteklassifizierung nach dem Saprobienindex besteht aus vier Güteklassen mit drei Zwischenstufen und ist in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Güteklassifizierung nach dem Saprobienindex (Patt 2018, S. 188)

Güteklasse	Grad der organischen Belastung	Saprobien-Index SI	BSB <sub>5</sub> (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	O <sub>2</sub> -Minima (mg/l)
I	Unbelastet bis sehr gering belastet	1,0–< 1,5	1	Spuren	> 8
I–II	Gering belastet	1,5–< 1,8	1–2	Um 0,1	> 8
II	Mäßig belastet	1,8–< 2,3	2–6	< 0,3	> 6
II–III	Kritisch belastet	2,3–< 2,7	5–10	< 1	> 4
III	Stark verschmutzt	2,7–< 3,2	7–13	0,5 bis mehrere mg/l	> 2
III–IV	Sehr stark verschmutzt	3,2–< 3,5	10–20	Mehrere mg/l	< 2
IV	Übermäßig verschmutzt	3,5–< 4,0	> 15	Mehrere mg/l	< 2

Mit der Einführung der EU-WRRL fand eine Weiterentwicklung und Verbesserung des bisherigen Systems zur Bewertung der Wasserqualität statt. Dafür wurde vom Umweltbundesamt (2003) eine gewässertypspezifische Anpassung des Saprobienindex vorgenommen. In Bezug auf die Ziele der EU-WRRL erfolgte dafür zunächst eine Ordnung der Fließgewässer nach insgesamt 20 verschiedenen Gewässertypen und im Anschluss daran eine Erarbeitung saprobieller Leitbilder für die jeweiligen Fließgewässertypen. Die saprobiellen Leitbilder gelten als Referenzzustände und entsprechen dabei dem Saprobienindex, welcher die natürlichen Gegebenheiten des jeweiligen Fließgewässertyps repräsentiert. Die EU-WRRL sieht für die Beurteilung der Auswirkungen von organischen Belastungen eine Bewertung nach fünf Qualitätsstufen vor. Diese entsprechen den nach EU-WRRL geforderten ökologischen Zustandsklassen „sehr gut“, „gut“, „mäßig“, „unbefriedigend“ und „schlecht“. Die Zuordnung erfolgt dabei anhand der prozentualen Abweichung vom saprobiellen Leitbild (UBA 2003, S. 19). Das siebenstufige Bewertungssystem in Deutschland wurde in der Folge an das fünfstufige System der EU-WRRL angepasst.

Das Umweltbundesamt hat im Jahr 2017 eine Erfassung des Zustands sowie eine Bewertung der Gewässer in Deutschland nach den Zielen der EU-WRRL vorgenommen. In Abbildung 3-2

ist der ökologische Zustand der Fließgewässer in Deutschland bezogen auf die bewertete Fließgewässerstrecke dargestellt. Bei der Bewertung erfolgt eine zusätzliche Differenzierung nach gewässermorphologischen und strukturellen Kriterien, wobei nach „natürlichen“, „erheblich veränderten“ und „künstlichen“ Wasserkörpern unterschieden wird.

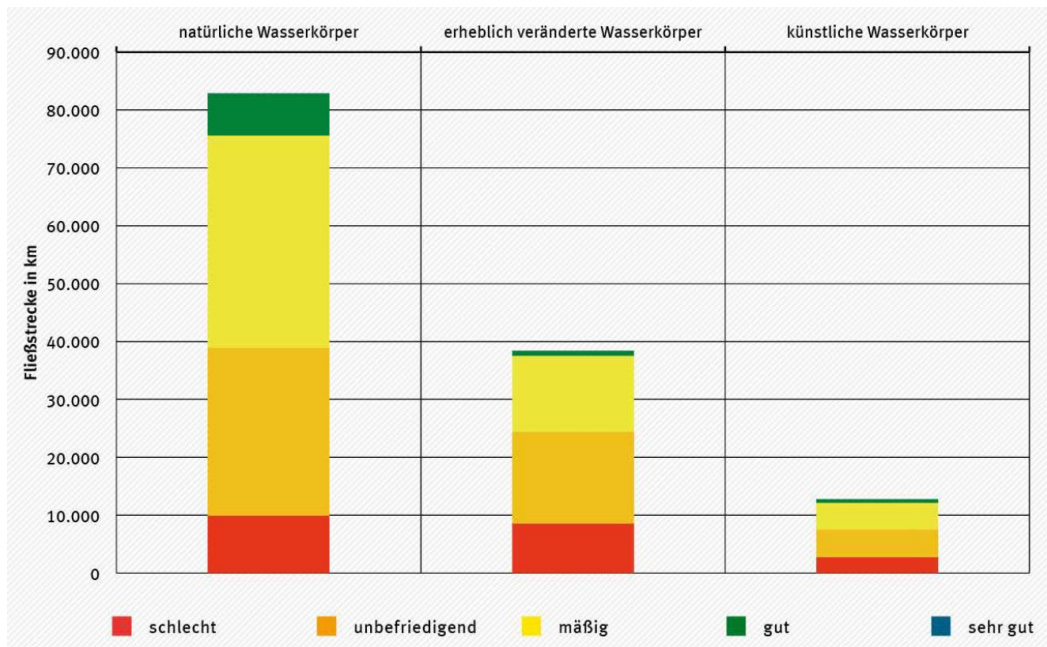


Abbildung 3-2: Ökologische Zustandsbewertung der Fließgewässer in Deutschland (UBA 2017, S. 43)

Als häufigste Ursache für das Abweichen von einem „guten ökologischen Zustand“ gilt insbesondere für natürliche Fließgewässer das hohe Maß an anthropogenen Nährstoffbelastungen. Die Ausführungen des UBA (2017) umfassen zudem auch eine Analyse der Nährstoffeinträge aus diffusen und punktförmigen Quellen sowie die Bewertung des chemischen Zustands der Fließgewässer in Deutschland. Diese Wasserqualitätskomponenten wirken sich auf den laufenden Betrieb von Wärmequellenanlagen in Fließgewässern aus, da sie zu Verschmutzungen an den wärmeübertragenden Flächen führen. Im nachfolgenden Kap. 3.2 werden diese Prozesse näher betrachtet.

### 3.2 Verschmutzungen an Wärmeübertragungsflächen

Im laufenden Betrieb eines Wärmeübertragers kommt es zur Bildung von Ablagerungen und Verkrustungen an den wärmeübertragenden Flächen. Diese unerwünschten Verschmutzungen werden als „Fouling“ bezeichnet und stellen sowohl Hersteller als auch Betreiber von Wärmeübertragern vor große Herausforderungen. Die abgelagerten Schichten führen aufgrund ihrer



niedrigen Wärmeleitfähigkeit zu einem erhöhten Wärmedurchgangswiderstand der wärmeübertragenden Flächen. Infolgedessen treten Leistungsverluste an der Anlage auf, welche wiederum erhöhte Kosten und Betriebsunterbrechungen aufgrund von Reinigungs- und Wartungsarbeiten bedingen. Eine Reduktion bzw. Vermeidung der Bildung von Foulingschichten ist demnach nicht nur aus technischen, sondern auch aus wirtschaftlichen Gründen erforderlich. (Schnell und Slipcević 1990, S. 54)

Der zusätzliche Wärmeleitwiderstand durch die Foulingschicht wird durch den sogenannten Foulingwiderstand  $R_f$  beschrieben. In der Fachliteratur wird oftmals der Ausdruck „Foulingfaktor“ verwendet, dieser ist jedoch nicht korrekt, da es sich um einen zusätzlichen, additiven Wärmeleitwiderstand und nicht um einen Faktor im eigentlichen Sinn handelt (VDI 2013, S. 92). Der Foulingwiderstand ist definiert als Differenz der Wärmedurchgangswiderstände für den verschmutzten und den sauberen Zustand der wärmeübertragenden Flächen. Dabei sind  $k_f$  und  $k_0$  die Wärmedurchgangskoeffizienten der verschmutzten bzw. sauberen Oberfläche.  $R_f$  kann zudem durch das Verhältnis von Dicke der Foulingschicht  $x_f$  zu deren Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$  ausgedrückt werden. Eine ausführliche Herleitung dieser Beziehung anhand einer Rohrwand ist bei Krause (1986, S. 6 f.) zu finden.

$$R_f = \frac{1}{k_f} - \frac{1}{k_0} = \frac{x_f}{\lambda_f} \quad (3.1)$$

Während des Foulingvorgangs findet an den Wärmeübertragungsflächen eine Ablagerung von Feststoffen statt. Unter Beachtung von (3.1) ergibt sich für die pro Flächeneinheit abgelagerte Feststoffmasse  $m_f$  (Krause 1986, S. 7):

$$m_f = \rho_f \cdot x_f = \rho_f \cdot \lambda_f \cdot R_f \quad (3.2)$$

Für konstante Werte der Dichte  $\rho_f$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$  ist  $R_f$  direkt proportional zu  $m_f$ . Bei den bisher beobachteten Foulingprozessen findet mehrheitlich neben dem Ablagerungsvorgang auch ein Abtragungsvorgang statt. Der Feststoffzuwachs der Foulingschicht kann demnach folgendermaßen beschrieben werden:

$$\frac{dm_f}{dt} = \dot{m}_d - \dot{m}_r \quad (3.3)$$

Als Indizes werden dabei in Anlehnung an die angelsächsischen Bezeichnungen  $d$  (deposit) für Ablagerungen und  $r$  (removal) für Abtragungen verwendet. In Abbildung 3-3 sind verschiedene

Ablagerungs- und Abtragungsvorgänge während des Foulingvorgangs an einer Wärmeübertragungsfläche dargestellt. Diese Prozesse können sowohl auf der warmen als auch der kalten Seite des Wärmeübertragers auftreten.

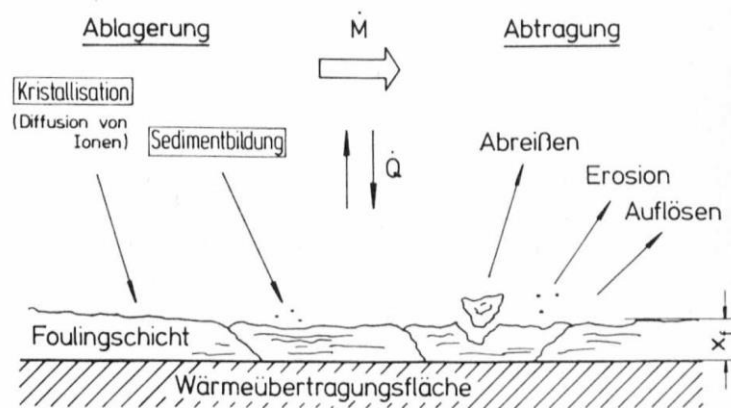


Abbildung 3-3: Verschiedene Ablagerungs- und Abtragungsvorgänge an einer Foulingschicht  
(Krause 1986, S. 7)

Wird die pro Flächeneinheit abgelagerte Feststoffmasse  $m_f$  bzw. der Foulingwiderstand  $R_f$  über die Zeit aufgetragen, ergeben sich die sogenannten Foulingkurven (siehe Abbildung 3-4). Bei der Kurvenform kann grundsätzlich nach drei verschiedenen Fällen unterschieden werden, welche durch das jeweilige Verhältnis von Verschmutzungszuwachs zu Verschmutzungsabtrag bestimmt werden. Der lineare Verlauf (Kurve 1) zeichnet sich durch einen konstanten Zuwachs der flächenbezogenen Feststoffmasse bzw. des Foulingwiderstands mit der Zeit aus und tritt überwiegend bei sehr zähen und harten Ablagerungen mit großer Adhäsionsfähigkeit auf. Kommt es mit zunehmender Schichtdicke zu einer Verlangsamung des Feststoffzuwachses, zeigt sich dies durch eine verringerte Steigung des Verlaufs (Kurve 2). Diese Form stellt sich bei Ablagerungen geringerer Festigkeit ein, da hier die Scherkräfte der Strömung wirksam werden und einen Abtrag der Feststoffe bewirken. Bei weichen Ablagerungen mit losem Gefügebau stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewicht zwischen Feststoffzuwachs- und abtrag ein, wodurch sich der Verlauf asymptotisch den Grenzwerten  $m_f^*$  und  $R_f^*$  annähert (Kurve 3). Jedoch ist hierbei in der Anfangsphase des Foulings eine lineare Zunahme des Foulingwiderstands durchaus möglich. Neben diesen drei Verlaufsmöglichkeiten kann auch ein sogenanntes Sägezahnverhalten auftreten. Dabei lösen sich die Ablagerungen stets nach einer kritischen Verweilzeit bzw. bei Erreichen einer kritischen Dicke der Foulingschicht und werden mit der Strömung wegtransportiert, wodurch der Verlauf der Kurve eine gezackte Form annimmt. (VDI 2013, S. 97)



Der zeitliche Verlauf des Foulingvorgangs kann ebenfalls in drei verschiedene Abschnitte unterteilt werden, die Induktion (I), den Übergang (II) und das Fouling (III). So ist während der Induktionsphase meist ein Betrieb des Wärmeübertragers ohne spürbare Verschmutzungen möglich. Im Übergangsbereich kann  $R_f$  sogar negative Werte annehmen, was auf eine Verbesserung des Wärmedurchgangs gegenüber einer unverschmutzten Wärmeübertragungsfläche hindeutet. Dies ist beispielsweise durch eine Erhöhung der Rauigkeit zu Beginn der Feststoffablagerungen begründet. Aus technischer Sicht kommt diesem Bereich jedoch keine Bedeutung zu. (Krause 1986, S. 7 f.)

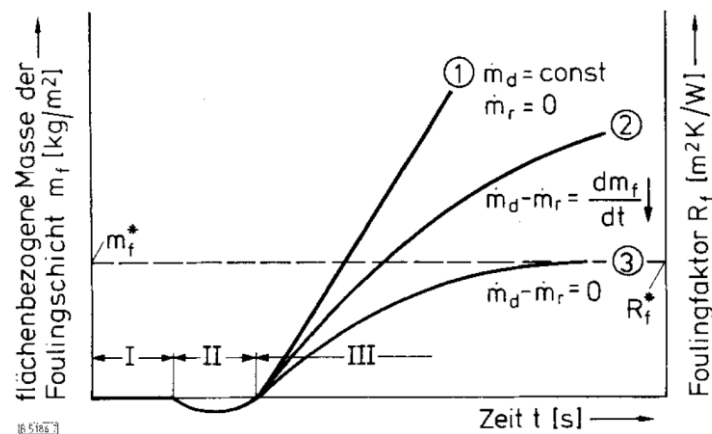


Abbildung 3-4: Zuwachs der Foulingschicht über die Zeit; ① konstant, ② abnehmend, ③ abnehmend bis hin zum Erliegen (Krause 1986, S. 8)

Die Entwicklung und Beschaffenheit der Foulingschicht hängt qualitativ von den Betriebsbedingungen des Wärmeübertragers ab. Die Ablagerungsbildung ist demnach meist proportional zur Konzentration der das Fouling verursachenden Komponenten. Zudem steigt der Foulingwiderstand meist mit einer Zunahme der Mikro-Rauigkeit der wärmeübertragenden Flächen sowie steigenden Heizflächentemperaturen an. Aufgrund dessen zeigt die warme Seite eines Wärmeübertragers in den überwiegenden Fällen eine höhere Anfälligkeit gegenüber Foulingprozessen als die kalte. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit ist hingegen eine Abnahme des Foulingwiderstands verbunden, da mit zunehmender Wandschubspannung größere Abtragsraten erzeugt werden. (VDI 2013, S. 97 f.) In Abbildung 3-5 ist der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit und des Verschmutzungsgrades auf den Foulingwiderstand von Kühlwasser beispielhaft dargestellt.

Für die Berechnung und Konstruktion von Wärmeübertragern bzw. die Gestaltung von Gegenmaßnahmen ist eine Beurteilung des Foulingverhaltens von wesentlicher Bedeutung. Die Vorhersage der auftretenden Verschmutzungen bereitet bei der Auslegung von Wärmeübertragern

jedoch einige Schwierigkeiten. Denn bei dieser Abschätzung sind neben einer Vielzahl physikalischer Einflussgrößen wie Strömungsgeschwindigkeit, Wandtemperatur, Temperaturdifferenz zwischen Wand und Fluid sowie Wärmestromdichte auch chemische Faktoren wie Zusammensetzung und Konzentration des Fluids, Korrosions- und Reaktionsverhalten und biologische Prozesse wie das Wachstum von Mikro- und Makroorganismen zu berücksichtigen. Es ist daher stets zu prüfen, welche Faktoren besonderen Einfluss auf den Foulingvorgang an den wärmeübertragenden Flächen ausüben. (Bohnet 1985, S. 26)

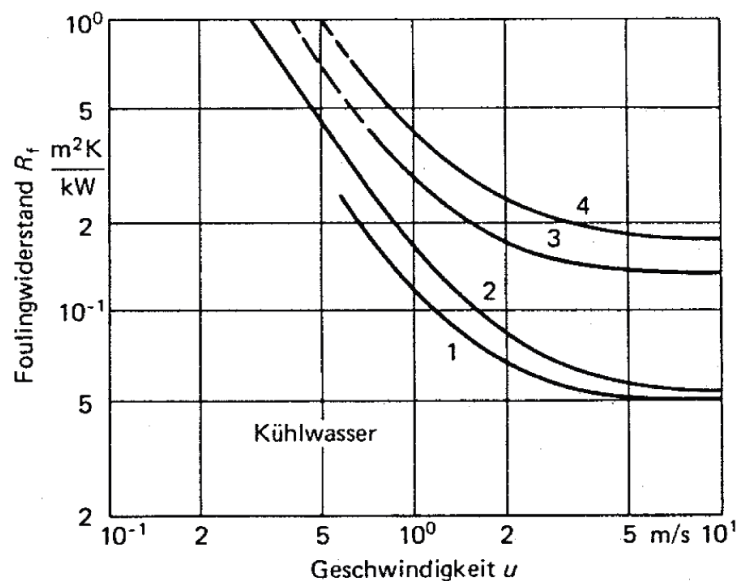


Abbildung 3-5: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf den Foulingwiderstand mit abnehmender Wasserqualität von 1 nach 4 (VDI 2013, S. 97)

Zwar wurden von der Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA) im Jahr 1941 Foulingwiderstände für zahlreiche Fluide veröffentlicht, diese basieren jedoch auf veralteten Konstruktionsverfahren und berücksichtigen weder die Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen noch die zeitlichen Verläufe des Foulingverhaltens. Dennoch werden diese kaum überarbeiteten Werte in der Praxis oftmals zur Berechnung von Wärmeübertragern herangezogen und führen häufig zu einer fehlerhaften Dimensionierung der wärmeübertragenden Flächen (VDI 2013, S. 93).

Der Prozess des Foulings kann durch verschiedene Mechanismen hervorgerufen werden. Die wesentlichen Arten von Fouling in Wärmeübertragern mit Flüssigkeitsströmungen sind in Abbildung 3-6 aufgeführt. Diese Vorgänge sind in ihrem Vorkommen jedoch nicht klar voneinander abzugrenzen, da die Verschmutzungen an Wärmeübertragungsflächen meist nicht nur auf

eine Ursache zurückzuführen sind, sondern auf komplexen Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Foulingmechanismen basieren (Epstein 1981, S. 33 f.).

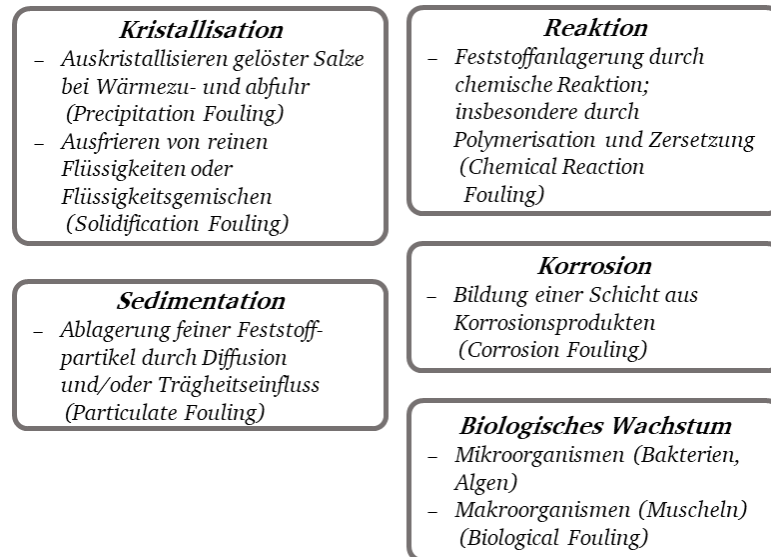


Abbildung 3-6: Foulingmechanismen in Flüssigkeitsströmungen (nach Krause 1986, S. 8)

Die Kristallisation gelöster Salze ist eine häufige Ursache für die Verschmutzung von Wärmeübertragern. Aufgrund von Verdampfungs- und Verdunstungsprozessen steigt die Salzkonzentration des Fluids bis zur Sättigung bzw. Übersättigung an. In dessen Folge kommt es in der Lösung zur Ausfällung von Salzkristallen und es bilden sich Ablagerungen in Form von Verkrustungen auf den wärmeübertragenden Flächen. Der Wachstumsprozess wird dabei maßgeblich von Oberflächenzustand und -temperatur der Wand bestimmt, da diese die Voraussetzungen zur Bildung von Kristallisationskeimen schaffen. Die Form der Kristalle kann sich jedoch unter Einfluss der Temperatur stetig verändern, wodurch der Einsatz von Gegenmaßnahmen oftmals wirkungslos bleibt. Das Verhalten der Ablagerungen wird maßgeblich durch den Löslichkeitscharakter der beteiligten Stoffe bestimmt. So bilden sich in Fluiden mit hohem Gehalt an Einzelsalzen überwiegend Verkrustungen mit großer Schichtdicke, dichtem Kristallgefüge sowie hoher Adhäsionsfähigkeit. Mischsalze führen dagegen zu Ablagerungen mit begrenzter Mächtigkeit, welche sich aus Kristallklumpen zusammensetzen und vielfach Weichstellen aufweisen. Eine Beeinflussung der Schichtdicke durch die Strömungsgeschwindigkeit ist bei der Kristallisation jedoch nicht gegeben. (Schnell 1988, S. 398-400)

Die Verschmutzung durch Sedimentation basiert auf den Ablagerungsprozessen von feinen Feststoffpartikeln infolge von Diffusion und Trägheitseinflüssen. Ein hoher Anteil an Feinmaterial im Fluid ist dabei zumeist auf eine Nutzung von natürlichen Wässern, wie bspw. bei der

Frischwasserkühlung, zurückzuführen. (Schnell 1988, S. 398) Eine umfassendere Erläuterung dieses Vorgangs wird daher in Kap. 4.4 gegeben.

Ablagerungen an Wärmeübertragern durch chemische Reaktionen treten infolge von Selbstoxidation und Polymerisation auf. Diese Vorgänge finden hauptsächlich bei der Aufbereitung von Kohlenwasserstoffen durch eine Berührung des Prozessstroms mit der erwärmten Wandfläche statt. Als Oxidationshilfen dienen dabei metallische Verunreinigungen an der Trennwand, wie z. B. Korrosionsprodukte. Die Reaktionsrate steht in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur, wobei hohe Temperaturen zu einer Hartkrustenbildung, auch Verkokung genannt, führen. Diese Kohlenwasserstoffverschmutzungen sind nur durch eine Verhinderung des Sauerstoffeintritts in den Prozessstrom zu vermeiden. Weitere Ablagerungsvorgänge aufgrund von chemischen Reaktionen sind beim Zerfall organischer Kühlmittel von Kernreaktoren sowie bei der Lebensmittelherstellung zu finden. (Schnell 1988, S. 400)

Für den Einsatz von Wärmequellenanlagen in Fließgewässern sind insbesondere die Vorgänge des biologischen Wachstums und der Korrosion von herausragender Bedeutung. Eine ausführliche Betrachtung dieser Prozesse sowie deren Einfluss auf die Funktionsfähigkeit von Wärmeübertragern erfolgt daher in Kap. 3.2.1 bzw. Kap. 3.2.2. Zudem wird in Kap. 3.3 eine Vorstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Reduzierung und Vermeidung von Fouling an Wärmeübertragungsflächen gegeben.

### 3.2.1. Beeinflussung des Wärmeübergangs durch Biofouling

Der Vorgang des biologischen Wachstums an Wärmeübertragungsflächen wird auch als Biofouling bezeichnet. Dabei lagern sich Mikroorganismen, wie z. B. Bakterien, auf den wärmeübertragenden Flächen an, vermehren sich dort und erzeugen einen sogenannten Biofilm. In natürlichen Gewässern wird dieser oftmals durch die Ablagerung von Makroorganismen wie Algen oder Muscheln zusätzlich verstärkt. Bei Biofouling handelt es sich um eine besonders schwerwiegende und komplizierte Form der Verschmutzung, da durch die mikrobiellen Ablagerungen überdies günstigere Bedingungen für weitere Foulingmechanismen geschaffen werden. Der Biofilm haftet in Form einer schleimigen Schicht an den Oberflächen der Werkstoffe und führt dort aufgrund seiner isolierenden Wirkung zu einer Reduzierung des Wärmestroms. (Schnell 1988, S. 402)

Die Anlagerung von Mikroorganismen an den Grenzflächen von fluiden Phasen ist ein natürlicher Prozess und läuft in nahezu allen nicht sterilen wasserführenden Systemen ab. Die Mikro-

organismen bilden an den Oberflächen durch Ausscheidungen eine Matrix aus Schleimsubstanzen, sogenannte extrazelluläre polymere Substanzen (EPS), und betten sich in diese ein. Das durch die EPS gebildete Hydrogel sorgt für Stabilität und eine dreidimensionale Struktur des Biofilms. Das Leben innerhalb eines Biofilms bietet den darin befindlichen Mikroorganismen somit einige ökologische Vorteile. Diese umfassen beispielsweise den Schutz vor toxischen Stoffen und hydraulischen Belastungen, den Aufbau synergetischer Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Zellen sowie die Anreicherung von Nährstoffen in der Matrix des Biofilms. (Flemming 1995a, S. 1 f.)

Die Voraussetzungen für die Entstehung und das Wachstum von Biofilmen sind ubiquitär und erfordern im Wesentlichen das Vorhandensein von vier Faktoren: Mikroorganismen, Oberflächen, Nährstoffe und Feuchtigkeit. Aufgrund ihrer hohen Adaptionsfähigkeit haben Biofilme ein entsprechend breites und vielfältiges Spektrum ihrer Existenz entwickelt. Eine Übersicht dieser Spannweite für verschiedenste Umgebungsbedingungen ist bei Flemming (1994, Tab. 2.3) zu finden. Durch die weitläufige Verbreitung sowie die günstigen Lebensbedingungen im Biofilm kommen über 99 % aller Mikroorganismen auf der Erde in dieser Form vor. Lediglich ein kleiner Anteil von weniger als einem Prozent existiert in vereinzelter, suspendierter Form in Wasser. (Costerton et al. 1987, S. 441) Die Bildung von Biofilmen an Oberflächen in wässrigen Systemen basiert auf verschiedenen physikalischen, chemischen und mikrobiellen Prozessen. Der grundlegende Ablauf ist in Abbildung 3-7 dargestellt und umfasst die folgenden Stadien (Characklis 1981, S. 256): (A) Transport und Anlagerung von organischem Material und Mikroorganismen an die Phasengrenzfläche. Dieser Vorgang ist zunächst reversibel, da die Adhäsion vorwiegend durch Van-der-Waals-Kräfte sowie hydrophobe und elektrostatische Wechselwirkungen erfolgt. (B) Irreversible Haftung der Mikroorganismen an der Oberfläche durch die Bildung von EPS. (C) Stoffwechselvorgänge und Vermehrung der angelagerten Mikroorganismen durch die Anreicherung von Nährstoffen und den Aufbau weiterer Biomasse. (D) Wachstum des Biofilms und Entwicklung einer dreidimensionalen Struktur. Dieser Vorgang wird durch die vorherrschenden Umgebungsbedingungen wie pH-Wert, Temperatur und Nährstoffverfügbarkeit gesteuert. (E) Ablösung und Weitertransport von Teilen des Biofilms durch Scherkräfte des Fluids. In diesem Stadium stellt sich meist ein Gleichgewicht zwischen Ablösungsprozess und Zuwachs an neuen Mikroorganismen ein.

Im Gegenteil zu den übrigen Foulingmechanismen wird der Umfang des Biofoulings nicht unmittelbar von der Konzentration der foulingbildenden Substanzen im Fluid bestimmt. Die Prozesse der Kristallisation und Sedimentation beispielsweise entstehen ausschließlich durch die

Ablagerung von suspendierten Stoffen aus der flüssigen Phase an den Oberflächen. Das Material für das Wachstum der Foulingschicht entstammt dabei quantitativ aus dem Fluid. In diesen Fällen kann das Fouling durch eine Eliminierung der entsprechenden Substanzen aus dem Fluid eingedämmt bzw. kontrolliert werden. Die Zunahme von Biofilmen basiert dagegen weniger auf der Anlagerung zusätzlicher suspendierter Zellen, sondern vielmehr auf dem anschließenden Wachstum der Mikroorganismen an der Oberfläche nach dem Adhäsionsvorgang. So besteht die Möglichkeit, dass nach einer Eliminierung von 99,9 % aller Mikroorganismen aus einem Fluid die verbleibenden 0,1 % als Impfmenge ausreichen, um das System zu infizieren und sich mithilfe von gelösten Nährstoffen zu vermehren. (Flemming 1995a, S. 6)

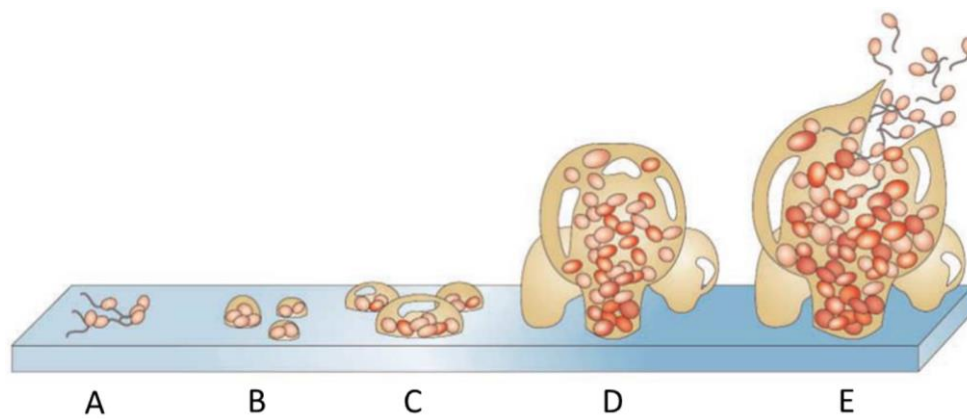


Abbildung 3-7: Schematischer Ablauf der Bildung von Biofilmen (Davies 2003, S. 115)

Die Struktur und das Ausmaß des Biofilms hängen daher, wie bereits oben beschrieben, überwiegend von der Verfügbarkeit organischen Materials sowie von Umgebungsfaktoren wie Temperatur und Strömungsverhältnissen ab. Aufgrund ihrer rauen Oberfläche und deren viskoelastischen Eigenschaften führen Biofilme außerdem zu einer Erhöhung des Reibungswiderstands. Damit wird die Ablagerung für suspendierte anorganische Partikel erleichtert und es entstehen günstigere Bedingungen für das Auftreten weiterer Foulingmechanismen. Der Prozess des Biofoulings ist daher für den Einsatz von Wärmequellenanlagen in Fließgewässern von besonderer Bedeutung.

Die Auswirkungen von Biofouling auf den Betrieb von Wärmeübertragern wurden bereits im Rahmen mehrerer experimenteller Studien untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die Bildung von Biofilmen an wärmeübertragenden Flächen zu einem deutlichen Anstieg von Wärmedurchgangswiderstand und Reibungswiderstand führt und infolgedessen erhebliche zusätzliche Kosten verursacht werden.

Characklis et al. (1981) untersuchten den Vorgang des Biofouling sowie dessen Einfluss auf die Wärmeübertragung für turbulente Strömungsverhältnisse an der Innenseite einer kreisförmigen Rohrwandung. Dabei konnte insbesondere eine Abhängigkeit des Biofilms von der Nährstoffverfügbarkeit festgestellt werden. So führte eine steigende Nährstoffkonzentration, hier in Form von Glukose, zu einer Zunahme von Mächtigkeit und Dichte des Biofilms. Mit wachsender Schichtdicke des Biofilms war in der Folge ein Anstieg des Wärmeübergangswiderstands zu verzeichnen. Außerdem konnte ein Zuwachs des Reibungswiderstands bei zunehmender Mächtigkeit des Biofilms festgestellt werden. Die in Abbildung 3-8 dargestellten Messergebnisse zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen dem verfügbaren Nährstoffangebot und dem Anstieg des Wärmeübergangswiderstands. Je höher dabei die Nährstoffzufuhr, desto schneller und ausgeprägter ereignet sich dieser Zuwachs. Insbesondere bei einer hohen Verfügbarkeit von Glukose zeichnet sich jedoch bereits nach kurzer Zeit ein ebenso stark ausgeprägter Abfall des Wärmeübergangswiderstands ab. (Characklis et al. 1981, S. 30 f.) Dieser Vorgang wird durch den Autor nicht näher erläutert, eine mögliche Erklärung könnte jedoch in einer geringen Stabilität des Biofilm aufgrund des schnellen Wachstums und somit eine starke strömungsbedingte Ablösungsrate liegen.

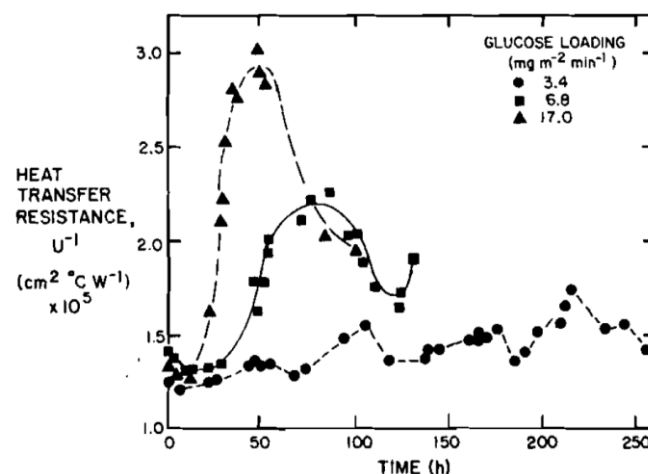


Abbildung 3-8: Einfluss des Nährstoffgehalts auf den Wärmeübergangswiderstand (Characklis et al. 1981, S. 31)

Neben diesen Zusammenhängen gewannen Characklis et al. (1981) zudem die Erkenntnisse, dass die Wärmeleitfähigkeit von Biofilmen im Grunde der Wärmeleitfähigkeit von Wasser entspricht und durch das Biofouling sowohl konduktive als auch konvektive Wärmeleitungsprozesse beeinträchtigt werden. Zudem wurde zur Verifizierung der Messergebnisse im Rahmen dieser Studie ein Rechenverfahren entwickelt, anhand dessen der Einfluss von Biofilmen auf



den Wärmeübergang bei Kenntnis der Schichtdicke des Biofilms, des Reibungskoeffizienten sowie der Temperaturen von Fluid und Trennwand hinreichend beschrieben werden kann.

In einer weiteren experimentellen Studie haben Bai et al. (2014) die Einflüsse von Wasserqualität und Fließgeschwindigkeit auf den Foulingwiderstand  $R_f$  von Wärmequellenanlagen in Oberflächengewässern untersucht. Dafür wurden die Experimente sowohl im Feld als auch unter Laborbedingungen durchgeführt. Die Felduntersuchungen fanden in einem Fluss während der Kälteperiode statt, um den Messungen die ungünstigsten Bedingungen für Wassertemperatur und Gewässereigenschaften zugrunde zu legen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Studie auf die Erfassung des gesamten Foulingvorgangs, nicht nur des Biofoulings, ausgerichtet wurde. Die wesentlichen Erkenntnisse von Bai et al. (2014) umfassen den Einfluss von Fließgeschwindigkeit und Größe der im Flusswasser enthaltenen Feststoffpartikel. Dabei konnte bei hohen Fließgeschwindigkeiten und größeren Partikeldurchmessern sowohl unter Feld- als auch Laborbedingungen eine bessere Wärmeübertragung festgestellt werden. Zudem zeichnete sich ein vierstufiger Verlauf des Foulingprozesses ab, welcher sich durch eine Induktionsphase, den zunächst langsamen und anschließend beschleunigten Anstieg des Foulingwiderstands bis hin zum maximalen und gleichbleibenden Wert auszeichnet.

Neben dem Einsatz von Wärmequellenanlagen in Fließgewässern gewinnt auch der Wärmeentzug aus Abwassersystemen zunehmend an Bedeutung. Da Abwässer zumeist über eine sehr hohe Belastung durch Feststoffpartikel und gelöste Stoffe verfügen, welche zudem einen hohen organischen Anteil aufweisen, ist eine Biofilmbildung in Abwassersystemen unvermeidbar. Das schweizerische Bundesamt für Energie (BFE 2004) hat daher die Bildung von Biofilmen an Wärmeübertragern in Abwassersystemen in einem Labor-Prüfstand untersucht. Der Fokus lag dabei insbesondere auf den Einflüssen der Fließgeschwindigkeit sowie periodischer Spülvorgänge auf die Ausprägung des Biofilms. Außerdem wurde die Anfälligkeit verschieden bearbeiteter und beschichteter Oberflächen hinsichtlich der Bildung von Biofilmen analysiert. Dabei kamen verschiedene Testplättchen aus Stahlblech mit unterschiedlich behandelten Oberflächen zum Einsatz. Im Rahmen der unterschiedlichen Versuchsdurchführungen stellte sich heraus, dass die Bildung von Biofilmen zu erheblichen Verlusten bei der Wärmeentzugsleistung führt und diese im Durchschnitt auf 60 % reduzierte. Mithilfe von Spülungseffekten durch eine kurzzeitige Erhöhung der Durchflussmenge konnte jedoch eine teilweise Abschwemmung des Biofilms und somit wieder eine Steigerung der Entzugsleistung auf 80 % erreicht werden. Außerdem wurde festgestellt, dass mithilfe von Beschichtungen das Auftreten von Verschmutzungen



an Wärmeübertragungsflächen reduziert werden kann. Eine konkrete Empfehlung zu der Beschichtungsart konnte aufgrund von fehlenden Kenntnissen zu Leistungsverlusten und Abriebserscheinungen allerdings noch nicht gegeben werden. (BFE 2004, S. 12)

### 3.2.2. Schädigung der Werkstoffe durch Korrosion

Der Vorgang der Korrosion wird in DIN EN ISO 8044 als „physikochemische Wechselwirkung zwischen einem metallischen Werkstoff und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und die zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann“ definiert. Diese Wechselwirkungen sind zumeist elektrochemischer Natur und werden durch die Anwesenheit von Feuchtigkeit hervorgerufen. Die Korrosion geht dabei von der Oberfläche selbst aus und verursacht durch chemische Reaktionen Beschädigungen am Material. Diese Werkstoffschäden bringen meist wirtschaftliche Herausforderungen mit sich, da sie zu Beeinträchtigungen im Betrieb technischer Systeme führen, verbunden mit einem erhöhten Aufwand für die Instandhaltung.

Auch die Oberflächen von Wärmeübertragern sind oftmals von Korrosion betroffen. Neben der Zerstörung des Materials findet dabei auch eine Bildung von metallischen Korrosionsprodukten statt, wodurch Verschmutzungen an den wärmeübertragenden Flächen entstehen. Das Korrosionsfouling kann sich dabei durch verschiedenartige Mechanismen äußern. Zum einen treten Korrosionserscheinungen unmittelbar an den Wärmeübertragungsflächen auf und bewirken dort durch gleichmäßigen Werkstoffabtrag sowie interkristalline Korrosion und örtliche Korrosion, auch als Lochfraß bezeichnet, eine unmittelbare Schädigung des Materials. Diese Erscheinungsformen sind in Abbildung 3-9 dargestellt. Zum anderen führen die anfallenden Korrosionsprodukte zum Aufbau von Verkrustungen mit hohem Wärmeleitwiderstand und besitzen zudem eine katalytische Wirkung für weitere Verschmutzungsursachen. Durch die Vergrößerung der Oberflächenrauheit werden sowohl die Sedimentation als auch die Keimbildung für Kristallisationsfouling gefördert. (Schnell 1988, S. 401)

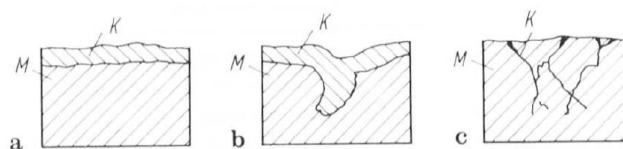


Abbildung 3-9: Erscheinungsformen von Korrosion: gleichmäßiger Werkstoffabtrag (a), örtliche Korrosion (b), interkristalline Korrosion (c); M Metall, K Korrosionsprodukte (Schnell 1988, S. 401)

Die Korrosion von Metallen ist ein elektrochemischer Grenzflächenprozess, der maßgeblich von lokalen Inhomogenitäten, den vorliegenden Redoxverhältnissen sowie der Sauerstoffkonzentration und dem pH-Wert beeinflusst wird. All diese Kriterien können durch mikrobielle Aktivität verändert werden. Mikroorganismen sind demnach in der Lage, durch die Erzeugung von günstigen Umgebungsbedingungen Reaktionen hervorzurufen bzw. deren Abläufe zu beschleunigen. Dazu müssen sie jedoch für gewöhnlich in Form von Biofilmen an den entsprechenden Oberflächen angelagert sein. Durch die Ausbildung einer Gelmatrix wird dort eine Diffusionsbarriere geschaffen, welche zur Konzentration von Stoffwechsel- und Korrosionsprodukten führt. Dieser Vorgang der mikrobiell beeinflussten Korrosion wird auch als MIC (microbially influenced corrosion) bezeichnet. Die Mikroorganismen bilden dabei jedoch keine neue Form der Korrosion, sondern beeinflussen lediglich den Ablauf der klassischen Reaktionen. Die elektrochemischen Grundlagen der Korrosion bestehen natürlich auch unter der Anwesenheit von Mikroorganismen, wodurch sich zumeist ein Zusammenspiel aus biotischen und abiotischen Teilprozessen entwickelt. Die wesentlichen Bestandteile bei elektrochemischen Vorgängen sind Anode, Kathode und eine wässrige Lösung, auch Elektrolyt genannt. Tritt eine metallische Oberfläche in Kontakt mit Wasser, findet eine Lösung von Metallionen statt. Dieser anodische Prozess führt zu einer Aufladung des Metalls und kommt durch Polarisation zum Erliegen:



Durch kathodische Prozesse kann eine Depolarisation hervorgerufen werden, hauptsächlich durch den Einsatz von Depolarisatoren wie Wasserstoffionen und molekularer Sauerstoff:

Wasserstoffionenreduktion („Säurekorrosion“)



Sauerstoffreduktion („Sauerstoffkorrosion“)



Folglich ist die Korrosionsrate in neutralen und sauerstoffarmen Lösungen am geringsten, vorausgesetzt die Konzentration an Depolarisatoren steigt nicht an. Dies kann jedoch durch mikrobielle Aktivität hervorgerufen werden. (Flemming 1995b, S. 50 f.)

Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) wirkt beispielsweise stark depolarisierend und kann von sulfatreduzierenden Bakterien (SRB) in großem Umfang gebildet werden. Diese Mikroorganismen spielen daher eine wesentliche Rolle bei den Vorgängen von MIC und gelten darüber hinaus als Ursache

für zahlreiche Korrosionsschäden in technischen Systemen. Die Bildung von Schwefelwasserstoff durch SRB findet überwiegend in den unteren, anaeroben Schichten eines Biofilms statt. Das Zusammenwirken verschiedener Komponenten in einem Biofilm ist für das Wachstum von SRB von wesentlicher Bedeutung, da sie auf die Stoffwechselprodukte anderer Arten angewiesen sind. Durch regelmäßige mechanische Zerstörung des Biofilms kann die Entwicklung von MIC daher stark verzögert werden. (Flemming 1995b, S. 51-53)

Andere Arten von Mikroorganismen im Biofilm bilden als Stoffwechselprodukte organische und anorganische Säuren, wodurch eine erhebliche Absenkung des pH-Werts an der Grenzfläche zum Metall induziert wird. Dadurch entstehen vergünstigte Bedingungen für die Wasserstoffionenreduktion nach Gl. (3.5) und es kommt zu Korrosionserscheinungen an nicht säurebeständigen Werkstoffen. Der Biofilm bewirkt des Weiteren eine heterogene Verteilung der Korrosionsprodukte auf der Materialoberfläche. Durch die Ausfällung von Salzen bieten sich außerdem weitere Möglichkeiten für die Anlagerung und das Wachstum von Mikroorganismen. Es kommt zur Entstehung von Bereichen mit niedrigem Redoxpotenzial in unmittelbarer Nähe zur Oberfläche. Diese Bedingungen begünstigen das Wachstum von fakultativ anaeroben Bakterien, auch in aeroben Wasserkörpern. Somit besteht für sulfatreduzierende und anaerob säurebildende Mikroorganismen die Möglichkeit, auch in aeroben System zu wachsen und ihre depolarisierende Wirkung zu entfalten. (Flemming 1995b, S. 53-55)

Als Beispiel für die Schädigung von Wärmequellenanlagen in Fließgewässern durch Korrosionsprozesse ist die Wärmepumpenanlage zur Beheizung des Mühlenviertels in Bamberg zu nennen. Die Anlage wurde in Kombination mit einer Wasserkraftanlage zur gleichzeitigen Nutzung von mechanischer und thermischer Energie errichtet und im Jahr 1983 in Betrieb genommen. Für die Wärmegewinnung wurde Flusswasser der Regnitz mithilfe des natürlichen Gefälles durch ein Verdampferbauwerk geleitet. Der Wärmeentzug dort fand durch Plattenwärmeübertrager statt, welche in drei verschiedenen Einheiten angeordnet waren und über eine Wärmeübertragungsfläche von insgesamt 2500 m<sup>2</sup> verfügten. Durch den Betrieb der Wärmepumpe konnte so eine thermische Leistung von 2400 kW generiert werden. (Hamerak 1996, S. 48 f.) Aufgrund des laufenden Kontakts mit dem Flusswasser kam es jedoch zu Korrosionserscheinungen an den Edelstahlflächen der Wärmeübertrager. Durch den Angriff des Flusswassers stieg die Gefahr von Undichtigkeiten an den Wärmeübertragern, woraufhin die Anlage außer Betrieb genommen werden musste. Da aus wirtschaftlicher Sicht ein Ersatz der Wärmeübertrager nicht infrage kam, erfolgte schließlich ein Rückbau der Anlage und die Wärme wird seither aus einem Fernwärmenetz bezogen. (Meyer 2018, o. S.)

Die bisher genannten Prozesse und Auswirkungen der Korrosion beziehen sich im Wesentlichen auf metallische Oberflächen. In technischen Systemen werden jedoch zunehmend synthetische Werkstoffe eingesetzt. Auch die Oberflächen von Wärmeübertragern sind inzwischen häufig aus Kunststoffen gefertigt, um die Leistungsverluste aufgrund von Materialzerstörung zu minimieren. Im Grunde zeichnen sich die meisten Kunststoffpolymere durch eine vollständige Resistenz hinsichtlich der biologischen Abbaubarkeit aus. Doch auch an synthetisch hergestellten Werkstoffen können unter ungünstigen Bedingungen mikrobielle Beeinträchtigungen auftreten. (Pommer 1995, S. 111) So wurde bei Kunststoffen in der Praxis bereits eine Vielzahl von Schadensfällen beobachtet, die als Korrosion bezeichnet werden können. Im Gegenteil zu metallischen Werkstoffen findet dabei jedoch keine Auflösung oder Zersetzung des Materials statt. Die Erscheinungsformen der Kunststoffkorrosion sind vielmehr durch Quellungen, Verfärbungen, Versprödung und Rissbildung gekennzeichnet. Die Ursachen für diese Schädigungen liegen dabei häufig im Zusammenspiel von unterschiedlichen chemischen und physikalischen Prozessen, in deren Folge eine komplexe molekulare Reaktion stattfindet. Jede messbare Veränderung der makromolekularen Struktur des Werkstoffs kann demnach bereits als Korrosionsvorgang eingestuft werden. (Schmitt 2004, S. 369) Doch auch die mikrobiell beeinflusste Korrosion tritt bei Kunststoffen auf. So wurden bisher mehr als 250 verschiedene Arten von Mikroorganismen an biologisch zerstörten Polymeren identifiziert. Kunststoffe gelten für Mikroorganismen als attraktive Besiedelungssubstrate, da sie dem mikrobiellen Stoffwechsel sowohl als Kohlenstoff- als auch Stickstoffquelle dienen. Es gibt daher praktisch keinen Kunststoff, welcher eine Immunität gegenüber mikrobieller Besiedelung aufweist. Im Biofilm gebildete Stoffwechselprodukte, z.B. organische Säuren, können an der Phasengrenzfläche zu einem Abbau der Polymere bzw. Additive führen. Dabei ist die Ausbildung von kleinen Löchern und Mulden sowie die Entstehung von Rissen im Material möglich. (Heinemann 2004, S. 24)

Grundsätzlich sind Kunststoffe dennoch weit weniger korrosionsempfindlich als metallische Werkstoffe und bieten daher insbesondere im Hinblick auf den Kontakt mit natürlichen Gewässern ein geeignetes Material für Wärmequellenanlagen.

### 3.3 Maßnahmen zur Reduzierung und Vermeidung von Verschmutzungen

In der Praxis wird die Verminderung des Wärmeübergangs infolge von Foulingvorgängen oftmals durch eine Überdimensionierung der Wärmeübertragungsflächen ausgeglichen. Dieser Ansatz weist jedoch einige Schwachstellen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit auf. (Reppich et al. 1993, S. 97) Vielmehr sollte vorab eine ausreichende Kenntnis über die Verschmutzungsursachen sowie die entsprechenden Prozessabläufe vorliegen, um bereits bei der Auslegung und Konstruktion des Wärmeübertragers potenzielle Strategien zur Eindämmung und Vermeidung des Foulings einzubeziehen.

Der Zeitpunkt spürbarer Verschmutzungen wird weitestgehend von der Oberflächenbeschaffenheit, z. B. Rauigkeit, Härte und Porosität, einer Wärmeübertragungsfläche bestimmt. So verfügen sehr glatte Oberflächen über eine lange Anfangsphase ohne Verschmutzungszuwachs, wodurch das Einsetzen der Foulingvorgänge verzögert wird. Raue Oberflächen schaffen hingegen durch eine Erhöhung der effektiven Kontaktfläche günstigere Bedingungen für die Sedimentation von Feststoffen und fördern zudem die für das Kristallisationsfouling notwendige Keimbildung, wodurch die Verschmutzungsschicht an Stabilität und Konsistenz zunimmt. Diese Voraussetzungen begünstigen wiederum die Anlagerung von Mikroorganismen sowie das daraus resultierende Wachstum von Biofilmen. Darüber hinaus ist die Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffs bei der Konstruktion der wärmeübertragenden Flächen zu berücksichtigen. Im Hinblick darauf sind Kunststoffbeschichtungen metallischen Oberflächen vorzuziehen, auch wenn diese einen höheren Wärmeleitwiderstand besitzen. Zudem ist eine mögliche Beanspruchung der Oberflächen durch spätere Reinigungsmaßnahmen bei der Wahl des Materials einzubeziehen. Erfolgt durch den Reinigungsprozess eine zusätzliche Aufrauhung der Oberflächen, steigt deren Anfälligkeit für erneuten Verschmutzungszuwachs und die Reinigungsmaßnahmen sind in kürzer werdenden Zeitabständen erforderlich. (Schnell 1988, S. 407) Doch neben der Auswahl des geeigneten Materials spielt bei der Vermeidung von Verschmutzungen auch die geometrische Ausführung des Wärmeübertragers eine entscheidende Rolle. So ist der störungsfreie Betrieb der Anlage maßgeblich von den umgebenden Strömungsbedingungen abhängig. Dabei sind insbesondere strömungsberuhigte Bereiche, wie z. B. Stagnationszonen in Ecken oder Spalten, zu vermeiden. Wärmeübertrager mit einfacher Geometrie und gleichmäßiger Geschwindigkeitsverteilung sind daher zu bevorzugen. Komplexe Geometrien können allerdings auch zu

starken Turbulenzen führen, wodurch die Ablagerung von Verschmutzungen wiederum erschwert wird. Diese Theorie wurde durch Untersuchungen an Rohrbündeln mit Rippenrohren bestätigt. (Schnell 1988, S. 407) Abbildung 3-10 zeigt den Einfluss der Fließgeschwindigkeit des Wassers auf den Foulingwiderstand  $R_f$  für verschiedene Foulingmechanismen. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Fließgeschwindigkeit der Foulingwiderstand langfristig für jede Art des Foulings einen abnehmenden Trend aufzeigt. Dies ist auf die steigenden Scherkräfte der Strömung zurückzuführen. In jedem Fall sollte jedoch bei der Konstruktion des Wärmeübertragers eine ungehinderte Zugänglichkeit der Anlagenteile für Reinigungsmaßnahmen und Wartungsarbeiten sichergestellt werden.

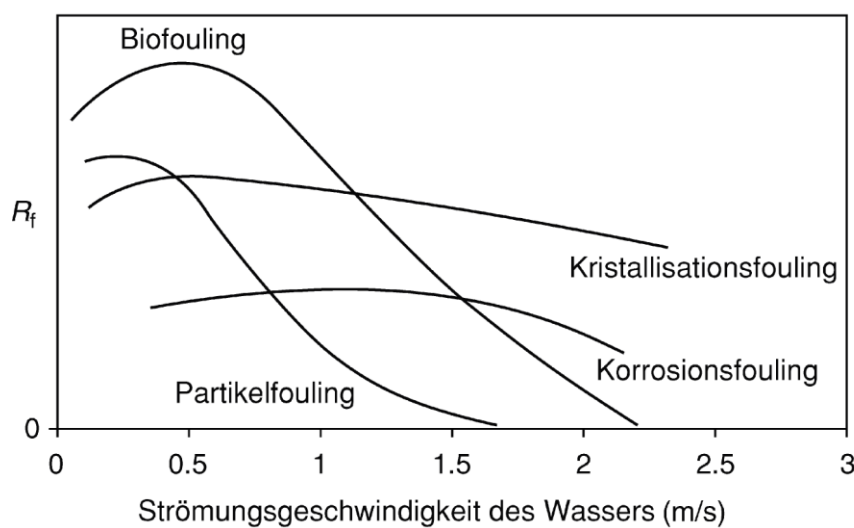


Abbildung 3-10: Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf verschiedene Foulingmechanismen (VDI 2013, S. 96)

Als weiterer Ansatz zur Vermeidung von Ablagerungen und Belägen wird von Isenburg (2009) eine Beschichtung der Wärmeübertragungsflächen vorgeschlagen. Die Beschichtungen führen zu einer Verbesserung der Antihafteigenschaften und des Verschleißschutzes und weisen darüber hinaus eine verbesserte Korrosionsbeständigkeit auf. Die Antihaftbeschichtungen wurden bislang an Platten- und Rohrbündelwärmeübertragern untersucht. Dafür wurden galvanotechnische Dispersionsschichten und Beschichtungssysteme aus Fluorpolymeren eingesetzt. Die Beschichtungen bewirken nahezu konstante Prozessbedingungen und eine Leistungsminderung infolge von Verschmutzungen an den wärmeübertragenden Flächen wird vermieden bzw. deutlich verringert. Als erfolgreiches Beispiel wird der Betrieb eines Plattenwärmeübertragers genannt, der zu Kühlzwecken mit Flusswasser betrieben wird. Aufgrund einer Fluorpolymerbeschichtung konnte die produktseitige Belagsbildung reduziert werden, wodurch deutlich größere Zeiträume zwischen den Reinigungszyklen ermöglicht wurden. Teilweise ist eine leichte

Belagsbildung entstanden, diese konnte jedoch mit einfachen Reinigungsmethoden entfernt werden. (Isenburg 2009, S. 51) Es ist jedoch zu beachten, dass eine Vermeidung von Verschmutzungen durch das Anbringen von Beschichtungen ausschließlich produktseitig festgestellt werden konnte. Die Anwendung von Antihaftbeschichtungen auf Seiten des Flusswasser wurde bislang nicht experimentell analysiert.

Da jedoch meist trotz präventiver Maßnahmen nach bestimmter Zeit Foulingverhalten an Wärmeübertragungsflächen auftritt, sind Reinigungsmaßnahmen zur Aufrechterhaltung der Wärmeentzugsleistung erforderlich. Diese können teilweise im laufenden Betrieb durchgeführt werden, meist sind die Maßnahmen jedoch mit Betriebsunterbrechungen verbunden. Eine umfassende Zusammenstellung und Beschreibung der verschiedenen „on-line“ und „off-line“ Methoden ist bei Müller-Steinhagen et al. (2011) zu finden. Es ist jedoch zu beachten, dass auch diese Methoden hauptsächlich auf die Beseitigung von produktseitigen Verschmutzungen bezogen sind.

Wärmequellenanlagen in Fließgewässern besitzen jedoch auch an den flussseitigen Wärmeübertragungsflächen eine starke Anfälligkeit für Verschmutzungen, insbesondere gegenüber den Prozessen des Biofoulings. Wie bereits in Kap. 3.1 beschrieben, ist die chemische und biologische Zusammensetzung von Fließgewässern von zahlreichen Einflüssen aus der Umgebung abhängig. Die Inhaltsstoffe werden den Gewässern dabei aus verschiedensten Quellen zugeführt bzw. durch Stoffwechselvorgänge gebildet. In den meisten Fällen verfügen die Fließgewässer daher über einen hohen Gehalt an biologisch abbaubaren Stoffen, anorganischen Nährstoffen, Partikeln und Mikroorganismen (Flemming 1995a, S. 135). Unter diesen Voraussetzungen besteht ein großes Potenzial für die Adhäsion von Mikroorganismen und das Wachstum von Biofilmen an den Flächen der Wärmequellenanlagen.

In industriellen Systemen kommen bei der Beseitigung von Biofilmen in den meisten Fällen Biozide zum Einsatz. Diese Form der chemischen Reinigung erweist sich als effektiv und ist darüber hinaus mit geringem Aufwand und niedrigen Kosten verbunden. Dafür stehen eine Vielzahl verschiedener Biozide zur Verfügung, als häufigstes Mittel werden jedoch meist Chlor oder Chlorverbindungen eingesetzt. (Characklis 1990a, S. 589 f.) Aufgrund ihrer toxischen Wirkung ist der Einsatz von Bioziden in natürlichen Fließgewässern jedoch unmöglich. Um den Prozessen des Biofoulings von Beginn an vorzubeugen, werden als präventive Maßnahme außerdem Behandlungen des Rohwassers vorgenommen. Die Mikroorganismen werden auch hier durch den Einsatz von Bioziden abgetötet und mithilfe von Filtern aus dem Wasser entfernt.



Zudem erfolgt eine Senkung des Nährstoffgehalts durch Biofilter und eine Zugabe von adhäsionshemmenden Stoffen. (Flemming 1995a, S. 136) Wird der Wärmeübertrager jedoch direkt in das Fließgewässer eingebracht, kann diese Strategie nicht angewendet werden.

Sowohl die Vermeidung als auch die Beseitigung von Biofouling an Wärmequellenanlagen in natürlichen Gewässern ist daher ausschließlich mit mechanischen Methoden zu bewältigen. Als mögliche Faktoren zur Destabilisierung und Abtragung von Biofilmen sind dafür die Scherkräfte des Wassers bei hohen Fließgeschwindigkeiten, eine mechanisch-abrasive Behandlung der verschmutzten Flächen und regelmäßige Grundreinigungen durch bspw. Ultraschall zu nennen. Schmid et al. (2003) haben im Rahmen experimenteller Untersuchungen den Einfluss der Scherkräfte bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen auf die Ausprägung von Biofilmen analysiert. Durch Messungen an unterschiedlichen Stellen im experimentellen Fließkanal zeigte sich, dass Turbulenzen und erhöhte Fließgeschwindigkeiten zur Ausbildung vergleichsweise dünner Biofilme führten (Schmid et al. 2003, S. 28). Die Gewährleistung von konstant hohen Scherkräften bietet somit eine Möglichkeit, das Wachstum von Biofilmen auf ein geringes Ausmaß zu begrenzen. Ist dennoch eine Reinigung des Systems durch mechanisch-abrasive Methoden erforderlich, ist zu beachten, dass sich mit zunehmendem Belagsalter die Haftung des Biofilms erhöht. Zwar wurden dazu keine quantifizierenden Untersuchungen durchgeführt, es ist jedoch davon auszugehen, dass die Entfernung des Biofilms umso leichter möglich ist, je jünger dieser ist. (Flemming 1995a, S. 122) Es ist daher zu empfehlen, den Abstand der Reinigungszyklen entsprechend kurz zu halten. Zwar müssen die Reinigungsmaßnahmen somit häufiger durchgeführt werden, sie sind jedoch langfristig mit einem geringeren Aufwand verbunden. Das Ausmaß der Biofilmentwicklung wird außerdem von den umgebenden Temperaturverhältnissen beeinflusst (Characklis 1990b, S. 573). Der Temperaturbereich für optimale Wachstumsbedingungen liegt dabei zwischen 15 und 40 °C. Die Problematik des Biofoulings ist demnach in den Wintermonaten weniger stark ausgeprägt als im Sommer. (Flemming 1994, S. 205) Diese Tatsache wirkt sich günstig auf die Nutzung von Wärmeübertragern in Fließgewässern aus, da der größte Bedarf an Wärmeenergie bekanntlich im Winterhalbjahr besteht. Es ist daher zu empfehlen, stets eine umfassende Reinigung der Wärmequellenanlage nach den Sommermonaten und damit unmittelbar vor dem Beginn der Heizperiode durchzuführen.

In unsterilen Systemen ist die Entstehung von Biofilmen praktisch nicht zu vermeiden. Es wird immer eine Primäradhäsion von Mikroorganismen an Oberflächen und das darauffolgende Wachstum stattfinden. In den meisten Systemen ist das Biofilmwachstum jedoch bis zu einem gewissen Ausmaß tolerierbar. Der strategische Ansatz besteht somit darin, die Entstehung von



Biofilmen nicht vollständig zu verhindern, sondern das Wachstum unterhalb einer Toleranzgrenze einzudämmen (siehe Abbildung 3-11). Ab welchen Abmessungen der Biofilm als problematisch anzusehen ist, steht in Abhängigkeit des jeweiligen Systems. Der Begriff des Biofouling ist folglich eher operational definiert und kennzeichnet das Ausmaß von Biofilmen, welches sich als störend erweist. Jedes System verfügt demnach über eine Toleranzschwelle, unterhalb derer das Biofilmwachstum keine nennenswerten Probleme darstellt. Dies ist auch in der Verwendung der Begrifflichkeiten zu beachten: „kein Biofouling“ ist demnach nicht gleichbedeutend mit „kein Biofilm“, sondern sagt lediglich aus, dass die Biofilmentwicklung unterhalb der Toleranzschwelle liegt. (Flemming 1994, S. 200)

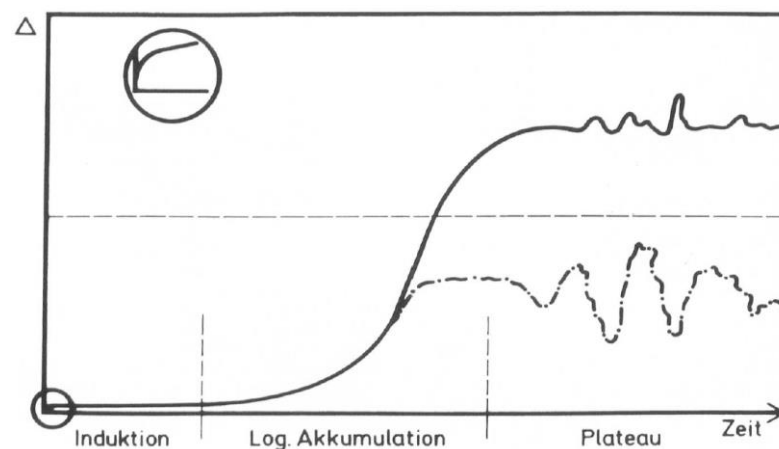


Abbildung 3-11: Entwicklung von Biofilmen mit hypothetischer Toleranzschwelle (gestrichelte Linie);  $\Delta$ : Biofilmzuwachs (Masse, Zellzahl, Dicke etc.) (Flemming 1995a, S. 9)

Um insgesamt das Foulingverhalten an den wärmeübertragenden Flächen bestmöglich zu vermeiden bzw. zu reduzieren, ist für den Einsatz in Fließgewässern eine Installation der Wärmequellenanlagen in Bereichen mit hohen Fließgeschwindigkeiten im Flussquerschnitt sowie eine turbulente Umströmung des Wärmeübertragers zu empfehlen. Da mit zunehmender Verbesserung der ökologischen Gewässergüte auch eine Erholung der Bestände aquatischer Organismen einhergeht, ist neben dem Auftreten von klassischen Ablagerungsbildungen und Verschmutzungen auch mit einer Ansiedelung von massiveren Organismen wie Muscheln und Schnecken an den Wärmeübertragungsflächen zu rechnen. Je nach Wachstum der Populationen und Größe der Organismen können diese ebenfalls zu einer enormen Beeinträchtigung der Wärmeentzugsleistung führen (Matosovic 2005, S. 260). Beim Einsatz von Wärmeübertragern in Fließgewässern sind eine regelmäßige Inspektion der Anlage sowie die Anwendung mechanischer Reinigungsmaßnahmen daher unvermeidlich.

## 4. Feststoffe in Fließgewässern

Neben den Einflüssen der Wasserqualität können auch Feststoffe in Fließgewässern zu einer Beeinträchtigung der Entzugsleistung von Wärmequellenanlagen führen. Durch mechanische Schädigungen oder Verlegungen am Wärmeübertrager ist der Betrieb der Anlage nur eingeschränkt möglich bzw. mit aufwendigen Reparatur- und Reinigungsmaßnahmen verbunden.

Die Feststoffe in Fließgewässern werden hinsichtlich ihrer Größe und Transporteigenschaften unterschieden und durch verschiedene Prozesse in das Gewässer eingetragen. Ein Überblick über die unterschiedlichen Feststoffarten sowie die jeweiligen Eintrags- und Transportvorgänge wird im folgenden Kapitel gegeben. Es beinhaltet zudem eine Erläuterung der rechtlichen Grundlagen bei der Entnahme von Rechengut sowie eine Betrachtung der konkreten Auswirkungen von Feststoffen auf den Betrieb von Wärmequellenanlagen.

### 4.1 Feststoffarten und Terminologie

Sowohl in der Fachliteratur als auch im alltäglichen Gebrauch existiert im deutschsprachigen Raum eine Vielzahl verschiedener Begrifflichkeiten zur Benennung von Feststoffen in Fließgewässern. Insbesondere für Stoffe, welche an bzw. unter der Oberfläche treiben, werden verschiedenste Begriffe herangezogen. Dies erschwert eine exakte Vergleichbarkeit von Forschungsergebnissen und kann außerdem zu Unstimmigkeiten und Verwechslungen in der Kommunikation verschiedener Fachdisziplinen führen. Im Folgenden werden daher die vorhandenen Definitionen für verschiedenen Feststoffarten aus bestehenden Normen und Regelwerken untersucht, um eine Abgrenzung der verschiedenen Begrifflichkeiten und Vorschläge für eine eindeutige Benennung herauszuarbeiten.

Im Allgemeinen verfügen natürlich vorkommende Arten von Wasser über Wasserinhaltsstoffe, wobei es sich nach DIN 4049-2 um „die im Wasser gelösten und ungelösten organischen und anorganischen Stoffe“ handelt. Die ungelösten Stoffe werden auch als Feststoffe bezeichnet und sind in DIN 4049-1 als „feste Stoffe, die im Wasser fortbewegt werden, ausschließlich Eis“ definiert. Dabei wird in „Schwimmstoffe, Schwebstoffe, Sinkstoffe und Geschiebe unterschieden“.

Die Unterscheidung von Feststoffen in Fließgewässern erfolgt in erster Linie anhand der Transportart (siehe Abbildung 4-1). Das Geschiebe wird rollend, gleitend oder springend entlang der Gewässersohle bewegt und setzt sich dabei überwiegend aus mineralischen Bestandteilen wie Sand, Kies und Steinen zusammen. Der Grenzdurchmesser für das Einsetzen der Bewegung wird dabei durch die Strömungsverhältnisse bestimmt. Als Schwebstoffe werden organische

und anorganische Feinpartikel bezeichnet, deren Verteilung sich über die gesamte Abflusstiefe erstreckt. Dabei handelt es sich überwiegend um feinsandiges, schluffiges oder toniges Material mit einem Durchmesser von bis zu 1 mm. Der Zustand der Schwebstoffe basiert zum einen auf dem Gleichgewicht der Partikel mit dem Wasser aufgrund ihrer Dichte, zum anderen hängt er von der lokalen Fließgeschwindigkeit sowie den vorliegenden Turbulenzverhältnissen ab. Können suspendierte Feststoffe nicht mehr in Bewegung gehalten werden, beispielsweise in strömungsberuhigten Gewässerabschnitten, sinken sie ab und bilden Sedimente an der Gewässersohle. (DWA 2017, S. 23) Als Treibgut werden an der Gewässeroberfläche treibende oder auch schwebende bzw. entlang der Sohle gleitende Stoffe bezeichnet, welche mit der Strömung in Fließrichtung befördert werden. Sie bestehen überwiegend aus partikulärem organischen Material (POM) mit einer Größenordnung von über 1 mm, wie beispielsweise Laub oder Ästen, sowie Zivilisationsabfällen und Eis. (DWA 2008, S. 5)

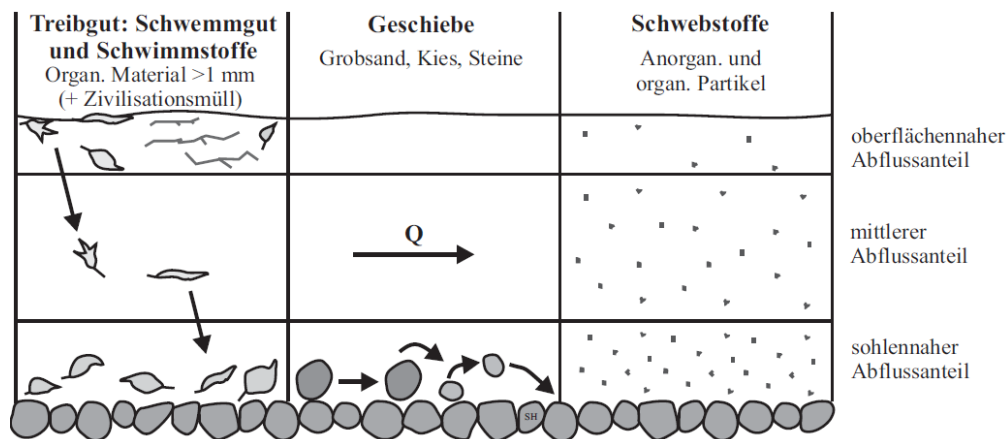


Abbildung 4-1: Feststoffarten in natürlichen Fließgewässern (DWA 2008, S. 6)

Für die oberflächennah transportierten Stoffe kommen unterschiedliche Bezeichnungen zum Einsatz, wobei sich jedoch keine einheitliche Verwendung abzeichnet. In der Fachliteratur werden sie meist als Treibgut oder Geschwemmsel bezeichnet, aber auch Begriffe wie Schwemmgut, Schwemmzeug, Rechengut, Treibsel oder Treibzeug kommen zur Anwendung. Die nachfolgende Abbildung 4-2 zeigt eine Übersicht der definierten Begriffe für oberflächennah schwimmendes Material in den bestehenden Normen und Regelwerken sowie deren Beziehungen untereinander. Es zeigt sich, dass für die einzelnen Bezeichnungen jeweils verschiedene Definitionen vorliegen und diese stellenweise sogar synonym verwendet werden. Somit ist eine klare Abgrenzung der normativen Begrifflichkeiten bzw. eine einheitliche Definition in den vorhandenen Regelwerken nicht gegeben.

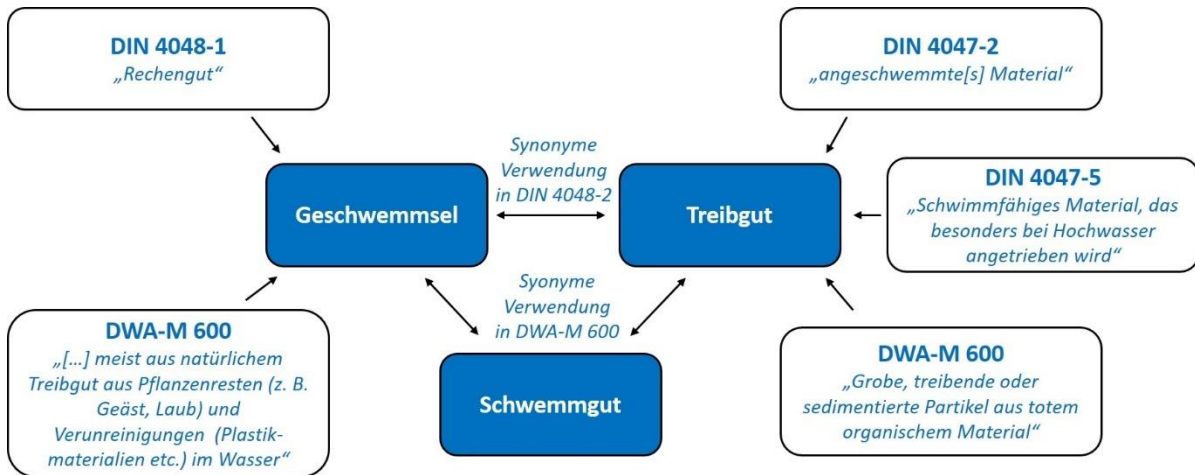


Abbildung 4-2: Terminologie für Schwimmstoffe in deutschsprachigen Regelwerken

Für die eindeutige Benennung im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden im Folgenden Begrifflichkeiten für die verschiedenen Formen von oberflächennah transportiertem Material festgelegt. Diese Definitionen orientieren sich weitestgehend an den Ausführungen des Merkblatts DWA-M 600: „Begriffe aus Gewässerunterhaltung und Gewässerentwicklung“ sowie den am häufigsten verwendeten Bezeichnungen in der Fachliteratur. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Gesamtheit aller oberflächennah transportierten Stoffe und Materialien im Folgenden als „Schwemmgut“ bezeichnet. Dabei wird außerdem nach „Treibgut“ und „Geschwemmsel“ unterschieden. Das Treibgut umfasst die größeren Bestandteile wie große Äste, Totholz und Zivilisationsmüll sowie die unter der Wasseroberfläche schwimmenden Materialien größeren Durchmessers. Treibgut wird auf verschiedensten Wegen in das Fließgewässer eingetragen, es tritt jedoch größtenteils nach Überschwemmungen und Hochwasserereignissen auf. Das Geschwemmsel dagegen ist durchgehend vorhanden und setzt sich zum Großteil aus organischen Partikeln wie Laub und kleineren Zweige zusammen. Es wird dem Fließgewässer überwiegend durch natürliche Eintragsprozesse aus den Uferbereichen zugeführt, wobei neben dem Eintrag von Vegetationsbestandteilen auch Verunreinigungen durch beispielsweise Kunststoffe entstehen können. Abgetrennte Stoffe nach dem Rückhalt durch eine Rechenanlage werden außerdem in ihrer Gesamtheit als „Rechengut“ bezeichnet.

Eine differenzierte Betrachtung der grundlegenden Prozesse beim Eintrag und Weitertransport von Feststoffen in Fließgewässern erfolgt im nachstehenden Kap. 4.2.

## 4.2 Eintrags- und Transportprozesse

In ihrem natürlichen Zustand sind Fließgewässer von den naturräumlichen Gegebenheiten des Einzugsgebiets wesentlich geprägt. Sie zeichnen sich meist als komplexe Systeme aus, welche sich stets in einem Anpassungsprozess an die umgebenden Bedingungen befinden. Damit variiert auch das Aufkommen von Feststoffen sowie deren Struktur und Zusammensetzung in Abhängigkeit der lokalen hydrologischen, topographischen, geologischen und wasserbaulichen Gegebenheiten sowie der Jahreszeit. (Giesecke und Heimerl 2000, S. 294) Die unterschiedlichen auftretenden Feststoffarten in Fließgewässern wurden dazu bereits im vorherigen Kap. 4.1 näher betrachtet.

Fließgewässer transportieren jedes Jahr große Mengen an gelösten und partikulären Stoffen vom Festland ins Meer. Die Feststoffe werden den Gewässern dafür durch eine Vielzahl verschiedener Prozesse zugeführt. Dabei kann grundsätzlich nach natürlichen und anthropogen bedingten Einträgen unterschieden werden. Die Zufuhr der Feststoffe erfolgt sowohl aus internen als auch externen Quellen, das heißt die Stoffe entstammen entweder dem Gewässer selbst oder aber dessen Einzugsgebiet. Ein Beispiel für eine natürliche und interne Feststoffzufuhr in Fließgewässern ist der transportbedingte Abtrag von Geschiebe an der Gewässersohle. Dabei findet durch die strömungsbedingte Aufwirbelung von Sedimenten eine Resuspension von Schwebstoffen statt. Zudem kann es zu einer Mobilisierung von Feststoffen aufgrund von Erosionsprozessen an den Gerinnwandungen und Uferbereichen des Gewässers kommen. Infolge von Niederschlagsereignissen findet darüber hinaus eine natürliche Schwebstoffzufuhr aus dem Einzugsgebiet statt. Durch Bodenerosionen in Form von Gerinneabtrag und flächenhaftem Abtrag werden Partikel aus dem Gelände suspendiert und mit dem Oberflächenabfluss den Fließgewässern zugeführt (siehe Abbildung 4-3). Die Menge und Beschaffenheit der natürlichen Schwebstoffe wird folglich durch die Widerstandsfähigkeit der Sohl- und Uferbereiche des Gewässers sowie die Niederschlagscharakteristik des entsprechenden Einzugsgebiets bestimmt. Gegenüber den anthropogenen Schwebstoffeinträgen nehmen die natürlichen Quellen hingegen nur eine untergeordnete Stellung ein. Die erhöhte Schlamm Bildung in Fließgewässern ist zum Großteil auf die zahlreichen Einleitungen von kommunalen und industriellen Abwässern sowie Abschwemmungen von bebauten Flächen zurückzuführen. Die Schwebstoffe gelangen dabei hauptsächlich über Kläranlagen, Regenwasserentlastungsanlagen sowie Straßenabläufe und Dränwässer in die Fließgewässer. (DVWK 1997, S. 3 f.)



Abbildung 4-3: Eintrag von Schwebstoffen aus dem Einzugsgebiet (Fluss Aoos in Griechenland, eigene Aufnahme)

Neben den Schwebstoffen werden auch Feststoffe größeren Durchmessers in das Gewässer eingetragen und zum Großteil als Schwemmgut an der Gewässeroberfläche von der Strömung mitgeführt. Die Menge und Zusammensetzung des Schwemmguts wird dabei durch lokale Gegebenheiten entlang des Fließgewässers, Witterungsverhältnisse sowie die Charakteristik des Einzugsgebiets beeinflusst. Bei Trockenwetterabfluss setzt sich das natürliche Schwemmgut überwiegend aus Pflanzenresten wie Falllaub und losen Wasserpflanzen zusammen. Durch das Auftreten von Unwetterereignissen können jedoch auch Wurzeln, Äste sowie teilweise ganze Bäume dem Gewässer zugeführt werden. (Pusch et al. 1999, S. 280 f.) Bei der Entstehung dieses organischen Schwemmguts spielt besonders die Art der Vegetation entlang des Flusslaufs eine entscheidende Rolle. Dabei handelt es sich meist um Wälder, Auen, Wiesen oder landwirtschaftliche Nutzflächen. Im jahreszeitlichen Rhythmus dieser Vegetation kommt es zu entsprechendem Anfall von Laub, Zweigen, Heu oder Resten von Baumsägearbeiten. Der Eintrag von anthropogenem Treibgut wird maßgeblich durch die Art der angrenzenden Siedlungsbebauung sowie die Zugänglichkeit der Ufer beeinflusst. (Giesecke und Heimerl 2000, S. 296) Je nach Zivilisationsverhalten und Gewässernutzung treten in Flüssen demnach Zivilisationsabfälle, wie z. B. Plastikfolie, Flaschen, Dosen und Gartenabfälle, aber auch Sonderabfälle wie Autoreifen, Leuchtstoffröhren, Fässer mit Chemikalien und Ölen, sowie Tierkadaver und auch menschliche Leichen auf (DWA 2008, S. 6). Des Weiteren induzieren sowohl die Binnenschifffahrt als auch die Freizeitliche Nutzung von Booten ein zusätzliches Aufkommen von anthropogenen Abfällen in Flüssen. Als Hauptursache für den Eintrag von Schwemmgut in Fließgewässer sind jedoch



Hochwasserereignisse und die damit einhergehenden Überschwemmungen der Flussauen anzusehen. Die hohe Wasserführung verursacht auf den überfluteten Flächen eine Mobilisierung von Sedimenten und Fallholz sowie Zivilisationsgegenständen jeglicher Art. Aufgrund der starken Strömungen und Turbulenzen bei Hochwasserabflüssen kommt es zu einer Verfrachtung dieser Materialien und einer späteren Ablagerung stromabwärts. (Haimann et al. 2018, S. 80 f.) Das Ausmaß des Feststofftransports hängt jedoch auch bei Hochwasserereignissen von der Beschaffenheit der Uferbereiche sowie der Charakteristik des Einzugsgebiets ab. Sowohl die Reichweite des Hochwassers im Überschwemmungsgebiet als auch die Art und der Bewuchs der Vorländer haben demnach einen großen Einfluss auf die anfallende Feststofffracht. (Giesecke und Heimerl 2000, S. 296)

Während ein Großteil der organischen Einträge als Schwemmgut oberflächennah transportiert wird, ist morsches Totholz in seiner Schwimmfähigkeit zeitlich eingeschränkt und wird nach einigem Verbleib im Gewässer daher eher schwebend mit der Strömung fortbewegt. Entlang des Gewässerverlaufs lagert sich das Totholz oftmals in hydrodynamischen Totzonen ab oder verankert sich aufgrund seiner sperrigen Abmessungen an der Gewässersohle. Da diese Ablagerungen selbst wiederum als Transporthindernisse wirken, bilden sich im zeitlichen Verlauf am Gewässergrund oftmals umfangreiche Totholzansammlungen aus. (Pusch et al. 1999, S. 281) Auch oberflächennah kommt es an Engstellen und Hindernissen häufig zu Verlegungen des Fließquerschnitts durch Ablagerungen von Treibgut und Geschwemmsel (siehe Abbildung 4-4). Je nach Ausmaß können diese Verkläusungen lokale Fließwiderstände verursachen und so die Abflussleistung des Fließgewässers deutlich reduzieren (Patt 2018, S. 263).

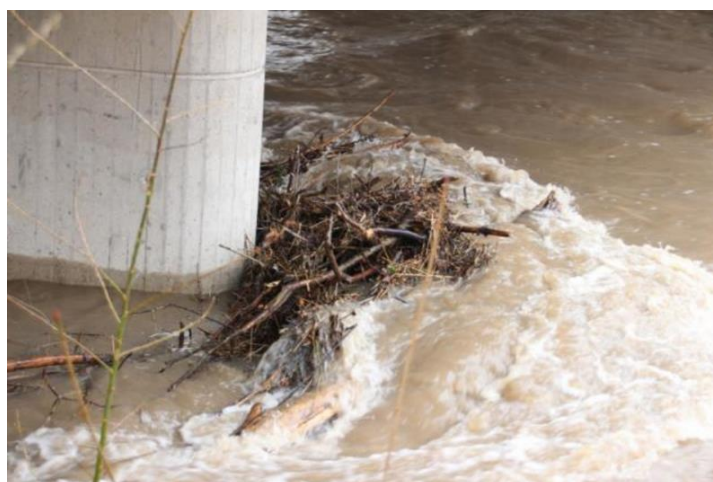


Abbildung 4-4: Treibgutansammlung an einem Brückenpfeiler (Hackl 2017, o. S.)

Der Geschiebetransport findet, wie bereits in Kap. 4.1 beschrieben, im sohlnahen Bereich statt und spielt somit eine wesentliche Rolle bei der Ausprägung des Gewässerbetts. Er wird im Wesentlichen von den Faktoren Abfluss, Gefälle, Sohlenstruktur und Feststoffverfügbarkeit gesteuert. Das stetige Wechselspiel aus Erosions-, Transport- und Sedimentationsprozessen bestimmt den Feststoffhaushalt und gestaltet eine vielfältige und dynamische Gerinnesohle. Diese setzt sich aus überwiegend mineralischen Stoffen zusammen, welche meist als rolliges oder bindiges Bodenmaterial vorliegen. Der Bewegungsbeginn des Sohlmaterials infolge des Strömungsangriffs hängt dabei nicht nur von den Eigenschaften des Materials, wie Korngröße, Kornform und Unterwasserverhalten, sondern auch vom Zustand der Sohlenoberfläche ab. So kann die Belastbarkeit einer dynamischen Sohle durch stabilisierende Effekte, wie bspw. erosionsbedingte Abpflasterung oder die Bildung einer biologischen Deckschicht, erheblich gesteigert werden. (Zanke 2013, S. 264) In der Regel kann der Bewegungsbeginn eines Korngemischs näherungsweise anhand eines charakteristischen Korndurchmessers bestimmt werden. Zwar sind größere Körner stärkeren Strömungsbelastungen ausgesetzt, sie besitzen allerdings auch eine größere Standfestigkeit gegenüber den einwirkenden Kräften. Kleinere Kornfraktionen weisen dagegen einen weitaus geringeren Erosionswiderstand auf, sie machen sich jedoch die Abschirmungseffekte zwischen den größeren Körnern zunutze. Aufgrund dieser Gegebenheiten setzt der Bewegungsbeginn für die verschiedenen Fraktionen eines Korngemischs annähernd gleichzeitig ein. (Patt 2018, S. 265)

Zur Bestimmung des Bewegungsbeginns von Sedimenten wird in den meisten Ansätzen davon ausgegangen, dass eine Gerinnesohle aus kohäsionslosem Material der strömungsinduzierten Schubbelastung nur bis zu einer kritischen Sohlenschubspannung  $\tau_c$  standhält. Demnach befindet sich das Sohlmaterial im Ruhezustand, so lange die transportwirksame Schubspannung  $\tau'$  die kritische Schleppspannung  $\tau_c$  nicht übersteigt. Für den Fall  $\tau' \geq \tau_c$  setzt die Bewegung der Sohle zunächst in Form von Geschiebetransport ein. Liegt ein sehr feines Sediment vor, kommt es bei Überschreitung der kritischen Sohlenschubspannung auch unmittelbar zu einer Suspension von Schwebstoffen. Bei gröberen Körnern tritt dieser Vorgang hingegen erst mit steigender Strömungsbelastung ein. Demzufolge kann hier eine zweite kritische Sohlenbeanspruchung definiert werden,  $\tau_{sc}$  für den Beginn des Schwebstofftransports. Bei sinkendem Strömungsangriff kommt für gröberes Material zunächst die Suspension von Schwebstoffen zum Erliegen, danach erst der Geschiebetransport. Im Gegenteil dazu endet bei feineren Körnern mit abfallender Strömungsbelastung als erstes die Geschiebebewegung. Der bestehende Schwebstofftransport kann also auch unterhalb von  $\tau_c$  noch stattfinden. Mit der Zeit lässt er jedoch nach, da für  $\tau < \tau_c$



keine weitere Suspendierung von Sedimenten stattfindet. Die kritische Sohlenschubspannung  $\tau_c$  ist jedoch nicht von der einwirkenden Schubbelastung, sondern ausschließlich von den Eigenschaften der vorhandenen Materialien abhängig. (Zanke 2013, S. 277 f.)

Zur Berechnung der kritischen Sohlenschubspannung  $\tau_c$  wird meist der Ansatz nach Shields (1936) herangezogen. Neben den Materialeigenschaften zählt hierbei auch die Schubspannung  $\tau$  zu den wesentlichen Einflussgrößen. Der Ansatz nach Shields (1936) beschreibt diese Zusammenhänge mithilfe dimensionsloser Kennzahlen und fasst diese in zwei Parametern zusammen. Den ersten Parameter bildet die kritische dimensionslose Schubspannung  $\tau_c^*$ , welche auch als kritische Strömungsintensität  $\theta_c$  interpretiert wird (Zanke 2013, S. 278):

$$\theta_c = \frac{v_c^{*2}}{\rho' g d_m} = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w) g d_m} = \tau_c^* \quad (4.1)$$

$\theta_c$	kritische Strömungsintensität	[N/m <sup>2</sup> ]
$v_c^*$	kritische Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$g$	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$d_m$	maßgebender Korndurchmesser	[m]
$\tau_c$	kritische Sohlenschubspannung	[N/m <sup>2</sup> ]
$\rho_s$	Dichte des Sohlmaterials	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	Dichte des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]

Die relative Dichte  $\rho'$  ist als  $\rho' = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$  definiert. Der zweite Parameter ist die sedimentologische Reynoldszahl  $Re^*$  mit  $v^*$  als Schubspannungsgeschwindigkeit (Zanke 2013, S. 272):

$$Re^* = \frac{v^* d_m}{\nu} \quad (4.2)$$

Mit diesen Kenngrößen sind somit alle maßgebenden Materialeigenschaften für die kritische Sohlenschubspannung einbezogen: der maßgebende Korndurchmesser  $d_m$ , die temperaturabhängige Viskosität  $\nu$  des Wassers, die Dichte von Korn ( $\rho_s$ ) und Fluid ( $\rho$ ) sowie die Erdbeschleunigung  $g$ . Die Korrelation der kritischen Strömungsintensität mit der sedimentologischen Reynoldszahl ermittelte Shields (1936) anhand zahlreicher experimenteller Versuche und entwickelte aus den Ergebnissen dieser umfangreichen Messungen das sogenannte Shields-Diagramm (siehe Abbildung 4-5). Aufgrund der starken Streuung der Messwerte zeigte sich jedoch, dass keine eindeutige Grenze für den Ruhezustand und die Bewegung des Sohlmaterials festgelegt werden kann. Der Bewegungsbeginn erstreckt sich vielmehr über einen größeren Bereich, welchen Shields entsprechend in seinem Diagramm markiert hat.

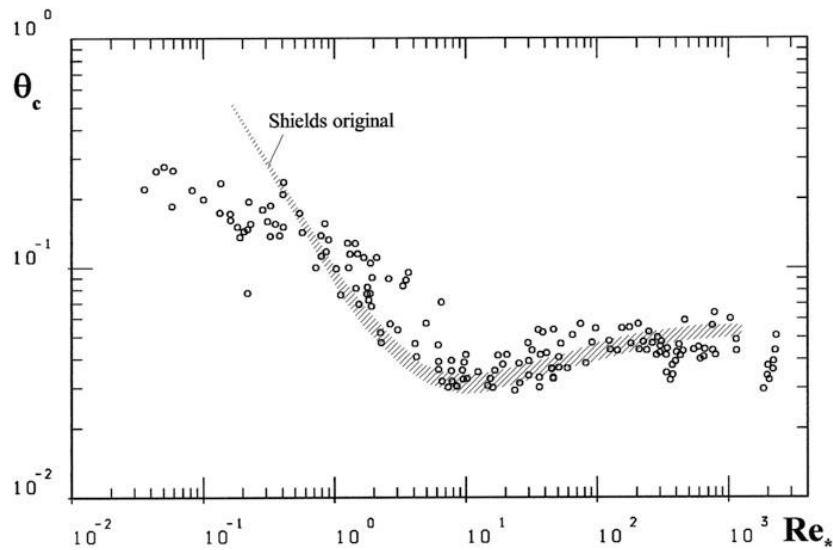


Abbildung 4-5: Shields-Diagramm, ergänzt um spätere Messergebnisse verschiedener Autoren (Zanke 2013, S. 279)

Über die Beständigkeit und den Bewegungsbeginn von Treibgut und Totholz in Fließgewässern gibt es in der Fachliteratur bislang nur wenige Beiträge. Diese sind überwiegend auf die Bewegung von Holzstücken ausgelegt und basieren auf stark vereinfachten mechanischen Modellansätzen, oftmals ohne dabei die umfassenden Wechselwirkungen zwischen dem Holz, den Sohlablagerungen und der Gewässerströmung zu berücksichtigen. Die Bewegung von größeren Hölzern in Fließgewässern wird jedoch stark von deren geometrischen Eigenschaften, wie bspw. Größe und Form, sowie der Dichte und der Zerfallsrate beeinflusst. Außerdem spielen die Abmessungen des Gewässers und die entsprechende Positionierung des Holzes eine entscheidende Rolle. So können abgelagerte Materialien von bereits bewegten Stücken mitgerissen werden, umgekehrt ist jedoch auch eine Blockierung von bewegtem Material durch Strömungshindernisse möglich. (Vergaro 2014, S. 65)

Nach Braudrick (1998, S. 11) tritt der Bewegungsbeginn eines Holzblocks ein, sobald die angreifenden Strömungskräfte den Reibungswiderstand an der Gewässersohle überschreiten. Außerdem wurde durch experimentelle Untersuchungen aufgezeigt, dass der Bewegungsbeginn weniger von der Größe des Stücks, sondern viel mehr von dessen Ausrichtung im Fließgewässer abhängig ist (Braudrick 1998, S. 71). Des Weiteren hat die Auftriebskraft am Holz aufgrund von Dichteunterschieden einen entscheidenden Einfluss auf die Transportart. Die Dichte des Holzes hängt dabei maßgeblich von dessen Alter und Zerfallsstadium ab. Frisches Totholz besitzt zunächst eine geringere Dichte als Wasser und treibt an der Gewässeroberfläche. Mit fortschreitendem Zerfall des Holzes kommt es jedoch zu einer zunehmenden Wassersättigung und

somit zu einem Anstieg der Dichte. Das Holz sinkt daraufhin unter die Wasseroberfläche und wird dort in Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse entweder schwimmend weitertransportiert oder lagert sich an der Sohle ab. (Vergaro 2014, S. 75)

Vergaro (2014) hat für den Bewegungsbeginn von Holzstücken einen ganzheitlichen Ansatz entwickelt, welcher auf einem stationären Gleichgewicht von Gewichtskraft, Auftriebskraft, Reibungskraft und hydrodynamischen Kräften basiert. Für den Bewegungsbeginn wird ein Zusammenhang von bekannten charakteristischen Größen, wie bspw. Froude- und Reynoldszahl, Größe und Ausrichtung sowie Dichte und Umströmung des Holzes, mit einer dimensionslosen Kennzahl  $E_p$  hergestellt. Die entsprechenden Grenzwerte für  $E_p$  für den Bewegungsbeginn wurden experimentell ermittelt und durch Versuchsergebnisse aus der Literatur ergänzt. Dieser Ansatz ermöglicht für Holzstücke unterschiedlicher Größe und Ausrichtung die Ermittlung des Grenzwertes für das Einsetzen der Bewegung und auch die Form der Fortbewegung. (Vergaro 2014, S. 161-163)

### 4.3 Rechtliche Grundlagen zur Entnahme von Rechengut

Wie zuvor in Kap. 4.2 beschrieben, findet in Fließgewässern ein erheblicher Transport von Schwemmgut unterschiedlicher Größe und Zusammensetzung statt. In Abhängigkeit von Wasserführung und Jahreszeit kommt es demnach zu größeren Ansammlungen von Feststoffen an den Rechenanlagen von Kraftwerkseinläufen oder sonstigen Wasserfassungen. Mit der zunehmenden Verlegung des Rechens treten im Flussquerschnitt erhöhte Fließwiderstände auf, wodurch eine Reinigung des Rechens durch Entnahme der Feststoffe erforderlich wird (Peter 1997, S. 14). Der Umgang mit dem entnommenen Rechengut stellt die Betreiber von Entnahmebauwerken jedoch zum Teil vor große Herausforderungen, da nach geltender Rechtsprechung das Rechengut bei der Entnahme in deren Besitz übergeht. Damit kommt den Kraftwerksbetreibern auch die Verantwortung einer ordnungsgemäßen Entsorgung des entnommenen Materials zu.

Die Behandlung des anfallenden Rechenguts basiert auf den beiden Rechtsgebieten des Wasser- und Abfallrechts. Den abfallrechtlichen Vorschriften entsprechend handelt es sich bei den entnommenen Feststoffen um Abfall, da es einen produktionsbedingt entstandenen Reststoff darstellt, dessen sich der Besitzer entledigen möchte (Giesecke und Heimerl 2000, S. 297). Nach § 3 Abs. 8 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) gilt der Anlagenbetreiber durch die Entnahme des Rechenguts somit als Abfallerzeuger und ist infolge des Verursacherprinzips dazu verpflichtet, eine gesetzeskonforme Behandlung der Abfälle vorzunehmen. Dem Umgang mit

Abfällen liegen dabei stets die Grundsätze zur Abfallvermeidung und Abfallbewirtschaftung sowie insbesondere die Abfallhierarchie nach § 6 Abs. 1 KrWG zugrunde. Diese entstammt der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie von 2008 (2008/98/EG) und legt für die Vorgehensweise beim Umgang mit Abfällen eine Rangfolge von Vermeidung über Recycling und Verwertung bis zur Beseitigung fest. Eine Vermeidung von Abfällen durch Wiedereinbringen des Rechenguts in das Fließgewässer ist jedoch unzulässig, da es sich dabei nach § 32 Abs. 1 Satz 1 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) um das Einbringen von Stoffen zum Zwecke ihrer Entledigung handelt (DWA 2008, S. 11). Einzig das Belassen des Rechenguts im Gewässer durch eine Ableitung ins Unterwasser über entsprechende bauliche Vorkehrungen ermöglicht eine Vermeidung von Abfällen sowie eine Verhinderung der Besitzübernahme durch den Anlagenbetreiber. Diese Nichtentnahme des Rechenguts sowie dessen Weitertransport mit der fließenden Welle wurde über einen langen Zeitraum hinweg von den zuständigen Behörden in nur wenigen Fällen bewilligt bzw. geduldet. (Giesecke und Heimerl 2000, S. 297)

Zunehmend festigt sich jedoch die Erkenntnis, dass natürliches und organisches Treibgut einen wichtigen Bestandteil für die Funktionalität von Gewässerökosystemen darstellt. Es beeinflusst die Hydraulik, Morphologie und Hydrologie des Gewässers und bildet durch stetige Anlandungs- und Abtragungsprozesse ein bedeutsames Bindeglied zu den angrenzenden Landbereichen. Zudem entstehen durch Totholzansammlungen und die Ablagerung von Treibgut wertvolle Lebensräume und Rückzugsgebiete für viele Tier- und Pflanzenarten. Diese verschiedenartigen und komplexen Lebensraumstrukturen zeichnen sich daher besonders durch eine hohe Biodiversität und Besiedlungsdichte aus. Für zahlreiche aquatische Lebewesen dient das organische Geschwemmsel, wie z. B. Falllaub oder Wasserpflanzen, zudem als Nährstoffbasis und führt so zu einer Steigerung der biologischen Produktivität innerhalb des Fließgewässers. Des Weiteren findet in den Treibgutablagerungen ein intensiver Abbau organischer Stoffe durch Mikroorganismen statt, womit eine verbesserte Selbstreinigungskapazität des Gewässers verbunden ist. Aufgrund der genannten ökologischen Wirkungen ist natürliches Schwemmgut ein wichtiges Element im Ökosystem von Fließgewässern und sollte folglich im Gewässer belassen bzw. wieder eingebracht werden. (Pusch et al. 1999, S. 282 f.) Dies entspricht auch den Bewirtschaftungsgrundsätzen in § 1 WHG, wonach „die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts [und] als Lebensraum für Tiere und Pflanzen [...] zu schützen“ sind, sowie den Forderungen der EU-WRRL nach einem guten ökologischen Zustand für oberirdische Gewässer. Lediglich der enthaltene Zivilisationsmüll ist dem Rechengut zu entnehmen und nach abfallrechtlichen Vorschriften zu entsorgen. In den vergangenen Jahren war jedoch ein stetiger Rückgang des

Müllaufkommens in den Fließgewässern zu verzeichnen. Für eine Entlastung der Anlagenbetreiber wäre infolgedessen eine Sortierung des Rechenguts zur Entfernung der Zivilisationsabfälle lediglich an vereinzelt Anlagen denkbar. (Pusch et al. 1999, S. 284) Ein entscheidender Grund für die Entnahme von Treibgut liegt allerdings in der Vermeidung der damit verbundenen Gefahren und Risiken, wie beispielsweise Verklausungen an Engstellen, Brücken und Durchlässen, da in deren Folge Rückstau, Ausuferungen, Überschwemmungen und Ufererosion auftreten können. Daher ist stets eine differenzierte Betrachtung der vorliegenden Rechengutfaktionen erforderlich und der Umgang damit von der zuständigen Wasserbehörde festzulegen. (DWA 2008, S. 13)

#### **4.4 Auswirkungen von Feststoffen auf Wärmequellenanlagen**

Verglichen mit Wärmepumpenanlagen, welche die Energiequellen Luft, Boden oder Grundwasser nutzen, sind die direkten Einwirkungen aus der natürlichen Umgebung auf Wärmequellenanlagen in Fließgewässern wesentlich vielfältiger und meist schwieriger vorherzusehen. Wie bereits in Kap. 4.2 beschrieben, werden Fließgewässer hinsichtlich ihrer Strömungsverhältnisse, der Wasserführung sowie der Wasserbeschaffenheit von zahlreichen hydrologischen, geochemischen und auch anthropogenen Einflussfaktoren bestimmt. Durch das direkte Einbringen des Wärmeübertragers in den Flusslauf ist die Apparatur stets diesen wechselnden Bedingungen und damit einhergehenden Risiken der Beeinträchtigung des Anlagenbetriebs ausgesetzt. Diese umfassen neben der mechanischen Schädigung der Anlage auch eine Reduzierung des Wärmetransports durch die Sedimentation von Feinmaterial sowie die Verlegung mit Schwemmgut.

In der Vergangenheit hat sich bereits gezeigt, dass bestehende Anlagen aufgrund von starken Strömungen, Schwankungen des Wasserstandes sowie mitgeführtem Treibgut schwere Schäden genommen haben und somit ersetzt bzw. ganz außer Betrieb genommen werden mussten (Scholt 1981, S. 180). Diese Einwirkungen werden insbesondere durch extreme Niederschlagsereignisse bzw. die Abführung von Hochwasserwellen hervorgerufen. Durch sehr hohe Fließgeschwindigkeiten, starke Strömungsdrücke und extreme Turbulenzen entsteht dabei ein mechanischer Angriff auf den im Fließquerschnitt befindlichen Wärmeübertrager. Zudem bewirken die hohen Schleppkräfte im Gewässer das Mitführen von großen Mengen an Treibgut mit teilweise erheblichem Ausmaß, welche bei einer Kollision mit dem Wärmeübertrager ebenfalls schwerwiegende Schäden an der Apparatur verursachen können.

Doch auch durch die feineren Partikel der Feststofffracht können Einschränkungen im Betrieb des Wärmeübertragers hervorgerufen werden. Durch das Absetzen von Schweb- und Sinkstoffen kommt es zu Sedimentationserscheinungen an den wärmeübertragenden Flächen und somit zu einer Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstandes. Diese Form der Verschmutzung wurde bereits in Kap. 3.2 kurz aufgegriffen. Der Prozess der Sedimentation von suspendierten Feststoffen kann in zwei unterschiedliche Absetzungsvorgänge unterschieden werden. Zum einen werden feinste Feststoffpartikel durch Schwankungsbewegungen im turbulenten Strömungsfeld an die Wärmeübertragungsflächen herangetragen und bleiben aufgrund von Adhäsionskräften daran haften. Diese feinen Einzelpartikel sind zwar nur mikroskopisch sichtbar, durch deren hohe Agglomerationsneigung kommt es jedoch zur Anhaftung weiterer Partikel und im zeitlichen Verlauf zur Ausbildung einer Sedimentationsschicht. (Krause 1986, S. 17) Zum anderen sedimentieren Partikel größeren Durchmessers aufgrund der Schwerkraft auf horizontalen Flächen, insbesondere bei Änderungen der Geschwindigkeit oder des Richtungsverlaufs der Strömung. Die Verschmutzung von Wärmeübertragungsflächen durch Sedimentation ist maßgebend von der Fließgeschwindigkeit des Fluids abhängig. Demnach ist keine Ablagerung von Partikeln möglich, wenn die darauf in Strömungsrichtung wirkenden Schubkräfte die senkrecht dazu wirkende Schwerkraft bzw. Adhäsionskraft übersteigt. Die anhaftenden Partikel werden durch Scherkräfte gelöst und mit dem Fluidstrom wegtransportiert. Eine wesentliche Einflussgröße für den Ablagerungsprozess ist das Grenzschichtprofil an der Wärmeübertragungsfläche. Dabei kommt auch der Oberflächenbeschaffenheit der Wandung eine wesentliche Bedeutung zu. Bei glatten Oberflächen weist die Grenzschicht eine geringe Dicke auf, wodurch der Einfluss des Strömungsangriffs auf die Partikel steigt. Im Umkehrschluss führen raue Oberflächen zwangsläufig zu einer größeren Grenzschichtdicke, wodurch günstige Bedingungen für die weitere Bildung von Foulingschichten geschaffen werden. Da die Ablagerung von Feststoffpartikeln zu einer Aufrauhung der Oberfläche beiträgt, kommt es mit dem Beginn der Sedimentation zu einer zunehmenden Verstärkung dieses Effekts. (Demski 2005a, S. 241) Um das Einsetzen des Sedimentationsprozesses bestmöglich zu verzögern, ist im Bereich des Wärmeübertragers eine starke Abnahme der Fließgeschwindigkeiten zu vermeiden. Außerdem ist der Anteil an horizontalen Flächen möglichst gering zu halten.

Durch das direkte Einbringen des Wärmeübertragers in den Fließquerschnitt eines Gewässers kann es neben den Ablagerungen von feinem Feststoffmaterial auch zur Verlegung mit Schwimmstoffen und Schwemmgut kommen. Die Festsetzung dieser Materialien hat wiederum eine Veränderung der Anströmverhältnisse zur Folge, wodurch sich negative Einflüsse auf den

Wärmeübergang ergeben können. Dieser Zusammenhang basiert auf den Wärmetransportvorgängen in Fluiden, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

Beim Übertrag von Wärme an ein strömendes Fluid kann grundsätzlich die Annahme getroffen werden, dass der Wärmetransport senkrecht zur Strömungsrichtung des Fluids verläuft. Durch den Eintrag der thermischen Energie erfolgt eine Anregung der Moleküle innerhalb der in Wandnähe auftretenden Grenzschicht. Aufgrund der freien Beweglichkeit von Molekülen im Inneren von fluiden Phasen werden diese von der Strömung fortbewegt und übertragen die Energie durch Impulsaustausch an weitere Moleküle. Durch die Molekülbewegung treten neben dem Wärmetransport senkrecht zur Strömungsrichtung also auch Transportprozesse in Strömungsrichtung des Fluids auf. Demzufolge ist der Wärmetransportprozess von der Molekülbewegungen innerhalb der Grenzschicht abhängig. Diese Beziehungen gelten ebenso in umgekehrter Weise für den Wärmeübergang von einer fluiden Phase an eine feste Wand. Der stattfindende Wärmetransport zwischen den beiden Medien wird als Wärmeübergang bezeichnet, wobei die Vorgänge in der Grenzschicht durch den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$  beschrieben werden. Dieser fließt beispielsweise bei der Berechnung der übertragenen Wärmemenge bei Vorgängen des konvektiven Wärmetransports mit ein (Demski 2005b, S. 5 f.):

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (4.3)$$

Dabei ist  $A$  die Kontaktfläche und  $(\vartheta_1 - \vartheta_2)$  die Temperaturdifferenz zwischen dem Fluid und der Wand. Der Wärmeübergangskoeffizient beruht beim materiegebundenen Wärmetransport im Wesentlichen auf den Eigenschaften der Grenzschicht, wobei die Wärmeübertragung entscheidend von der Grenzschichtdicke abhängt. Diese setzt sich zusammen aus der ruhenden Molekülschicht unmittelbar an der Wand sowie der laminaren Unterschicht (siehe Abbildung 4-6).



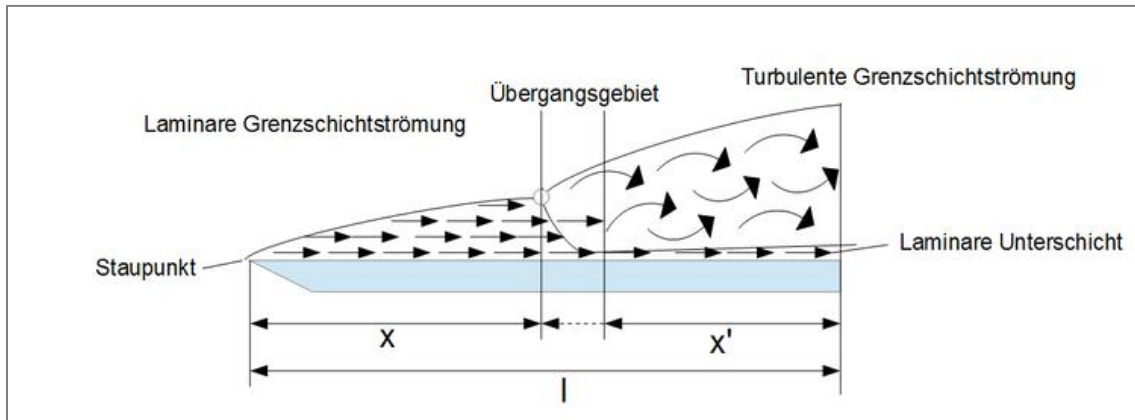


Abbildung 4-6: Laminare und turbulente Grenzschichtströmung (examio GmbH o. J.)

Die ruhende Molekülschicht besteht dabei in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit, die laminare Unterschicht basiert auf der mittleren Strömungsgeschwindigkeit sowie auf stoffspezifischen Größen des Fluids. Die Strömungsvorgänge in Fluiden werden durch eine dimensionslose Kenngröße, die Reynoldszahl  $Re$ , beschrieben:

$$Re = \frac{v_m d}{\nu} \quad (4.4)$$

Dabei ist  $v_m$  die mittlere Strömungsgeschwindigkeit,  $d$  der hydraulische Durchmesser und  $\nu$  die kinematische Viskosität des Fluids. Die Reynoldszahl kennzeichnet die Bereiche für laminare ( $Re < 2300$ ) und turbulente Strömung ( $Re > 2300$ ) sowie einen Übergangsbereich, in welchem beide Strömungsformen zu erwarten sind.

Bei turbulenter Strömung ist die laminare Unterschicht aufgrund der Molekülbewegungen senkrecht zur Hauptströmung des Fluids nur sehr dünn ausgebildet. Wirbelbildungen sorgen für eine Durchmischung der Fluidschichten aus dem Randbereich mit der Hauptströmung, wodurch eine Verringerung der Grenzschichtdicke stattfindet und günstige Bedingungen für den Wärmeübergang geschaffen werden. (Demski 2005b, S. 6-8) Für einen optimalen Wärmeentzug sollten die Strömungsverhältnisse am Wärmeübertrager daher nicht nur aus Gründen der Foulingvermeidung (vgl. Kap. 3.3) stets im turbulenten Bereich liegen. Auch bei der Konstruktion von Schutzmaßnahmen ist daher sicherzustellen, dass diese Turbulenzen aufrechterhalten werden bzw. durch den Strömungswiderstand möglicherweise noch verstärkt werden.



## 5. Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Wärmeübertragungssysteme für den Einsatz in Fließgewässern untersucht. Dafür wurden sowohl strömungs- als auch wärmetechnische Messungen durchgeführt und die Ergebnisse hinsichtlich der Wärmeentzugsleistung sowie den umgebenden Strömungsbedingungen ausgewertet. Die messtechnische Erfassung der Daten erfolgte am wärmeströmungstechnischen Prüfstand des Fachgebiets für Wasserbau und Hydraulik an der Technischen Universität Darmstadt.

Der Versuchsaufbau simuliert die direkte Anströmung eines Wärmeübertragers im Fließgewässer im Maßstab 1:1. Um außerdem die naturnahen Bedingungen einer Umweltwärmequelle zu schaffen, wurde der Prüfstand auf dem Außengelände des wasserbaulichen Forschungslabors errichtet. Somit besteht die Möglichkeit, die Wärmeentzugsleistung auch bei niedrigen Wassertemperaturen zu untersuchen und die Gefahr der lokalen Vereisung am Wärmeübertrager bzw. im Fließgewässer zu beurteilen. Bei den eingesetzten Wärmeübertragungssystemen handelt es sich um Prototypen, welche von der Fa. FRANK GmbH hergestellt und für die experimentellen Untersuchungen zur Verfügung gestellt wurden.

### 5.1 Aufbau der Versuchsanlage

Der Aufbau und die Struktur des wärmeströmungstechnischen Prüfstandes sind schematisch in Anhang I dargestellt. Die Anlage setzt sich im Wesentlichen aus vier verschiedenen Kreisläufen zusammen. Diese umfassen die Zirkulation des Wassers im Strömungskanal, den Primärkreislauf des Wärmeträgermediums, die Zirkulation des Kältemittels in der Wärmepumpe sowie den an die Wärmepumpe angeschlossenen Heizkreislauf.

Die wärmeströmungstechnische Untersuchung der verschiedenen Wärmeübertragungssysteme erfolgt innerhalb des Versuchsbeckens im Außenbereich. Dieses wird mit Wasser aus dem Kreislauf des wasserbaulichen Forschungslabors befüllt und simuliert die Umweltwärmequelle. Mithilfe einer Kreiselpumpe wird durch das angeschlossene Rohrsystem ein Tauchstrahl erzeugt, der das Becken durchströmt und somit näherungsweise die natürlichen Strömungsverhältnisse in einem Fließgewässer schafft. Nach dem Eintritt der Strömung in das Rohrsystem ist zur Erfassung des Durchflusses ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät (MID) installiert. Außerdem ist eine Absperrklappe für den Abbau der überschüssigen Förderhöhe der Kreiselpumpe nachgeschaltet. Der Untersuchungsbereich für die Wärmeübertrager befindet sich innerhalb der

Kernzone des Tauchstrahls. Dort herrscht eine nahezu gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung. Für ein quasi-stationäres Verhalten des Tauchstrahls ist eine Symmetrie von Mindestüberdeckung und Mindestbodenabstand entlang der Tauchstrahlachse erforderlich. Der Austrittsquerschnitt des Tauchstrahls ist kreisförmig und besitzt in Anpassung an die maximale Ausdehnung der Wärmeübertrager einen Durchmesser von 0,6 m. Anhand dieser Voraussetzungen wurde die Mindestüberdeckungshöhe zu 0,9 m berechnet, wodurch sich für das Versuchsbecken eine erforderliche Wassertiefe von 1,80 m ergibt. Nach dem Austritt in das Versuchsbecken wird der Tauchstrahl von der Zulaufströmung der Kreiselpumpe direkt wieder erfasst und weist dadurch einen nahezu konstanten Querschnitt über die gesamte Länge des Versuchsbeckens auf. Um eine möglichst gleichförmige Anströmung des Wärmeübertragers zu gewährleisten, verfügen die Aus- und Eintrittsöffnungen des Tauchstrahls über den gleichen Durchmesser und sind auf demselben Achsenniveau angeordnet. Vor dem Austritt wird außerdem bereits im Rohr durch eine stufenweise Querschnittserweiterung sowie eine strömungsberuhigte Vorkammer und einen Gleichrichter ein gleichmäßiges Strömungsverhalten herbeigeführt. Der Einbau des Wärmeübertragers erfolgt auf Höhe des Austrittsquerschnitts, jedoch mit einigem Abstand zur Öffnung, um eine ausreichende Umströmung des Wärmeübertragers zu gewährleisten. (Borchardt 2018a, S. 31) In Abbildung 5-1 ist beispielhaft der Einbau des Wärmeübertragersystems „TwinSheet“ in den Strömungskanal dargestellt.

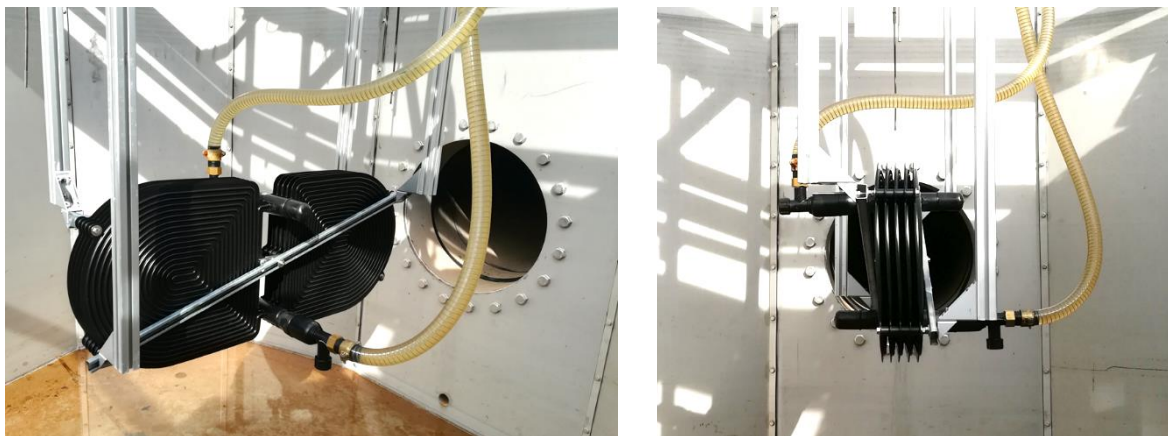


Abbildung 5-1: Wärmeübertragersystem „TwinSheet“ im Strömungskanal

Der Wärmeübertrager ist zur Abführung der entzogenen thermischen Energie über ein Wärmepumpensystem mit einem Heizkreislauf verbunden. Die Wärmeabnahme erfolgt im Heizkreislauf durch einen Warmwasserspeicher und einen konventionellen Heizkörper. Durch den Warmwasserspeicher wird an die Wärmepumpe ein Wärmebedarf übermittelt. Die Wärmepumpe stellt daraufhin das Wärmeträgermedium in einem Pufferspeicher auf die vorgegebene

Vorlauftemperatur ein. Da die Temperatur der Umweltwärmequelle im Außenbereich nicht ohne weiteres regulierbar ist, wird die erforderliche Temperaturdifferenz für den Betrieb des Wärmeübertragers durch eine entsprechende Temperierung des Wärmeträgermediums geschaffen. Zwischen der Wärmepumpe und dem Pufferspeicher ist als Systemtrennung ein zusätzlicher Plattenwärmeübertrager angeordnet, um die Untersuchung verschiedener Wärmeträgermedien zu ermöglichen. Für den Betrieb der Wärmequellenanlage wird das Wärmeträgermedium mit einer Umwälzpumpe aus dem Pufferbehälter durch den zu untersuchenden Wärmeübertrager im Versuchsbecken gefördert. Zur Ermittlung der Entzugsleistung werden die Vor- und Rücklauftemperaturen des Wärmeträgermediums sowie die Zu- und Ablauftemperaturen des umströmenden Wassers am Wärmeübertrager durch entsprechend angeordnete Temperaturfühler erfasst. Außerdem erfolgen kontinuierliche Messungen der jeweiligen Durchflüsse im Strömungskanal und im Primärkreislauf, des Differenzdrucks an der Umwälzpumpe für das Wärmeträgermedium sowie der Fließgeschwindigkeiten am Wärmeübertrager. (Borchardt 2018b, S. 23 f.) Anhand dieser Daten kann für die untersuchten Wärmeübertragssysteme die Wärmeentzugsleistung für unterschiedliche Bedingungen bestimmt werden.

## 5.2 Methodik und Messtechnik

Die Untersuchungen an den verschiedenen Wärmeübertragungssystemen wurden einheitlich anhand der nachfolgend beschriebenen Methodik durchgeführt. Dieses schematische Vorgehen ermöglicht nicht nur eine Vergleichbarkeit der Wärmeübertrager untereinander, sondern lässt auch Rückschlüsse über die Auswirkungen von Umgebungseinflüssen zu.

### 5.2.1. Betriebszustand und Einfluss der Fließgeschwindigkeit

Im ersten Schritt erfolgt die Montage des Wärmeübertragers in den Untersuchungsbereich des Strömungskanals. Dabei ist zu beachten, dass sich das System möglichst nah an der Einlauföffnung befindet und auf die Höhe der Rohrachse ausgerichtet ist. Über Spiralschläuche wird der Wärmeübertrager mit dem Primärkreislauf verbunden. Anschließend wird der gesamte Primärkreislauf mit dem Wärmeträgermedium, in diesem Fall Wasser, befüllt und über das Pufferbecken sowie eingebaute Schnellentlüfter am Vor- und Rücklauf entlüftet. Nach der vollständigen Entlüftung des Systems wird die Kennlinie der Umwälzpumpe erstellt. Dafür wird die Drehzahl der Umwälzpumpe ausgehend von 100 % bei  $n_{\max}$  in 5 %-Schritten sukzessive bis zur minimalen Drehzahl bei 41 % reduziert. Dabei werden die Fördermenge  $Q_{\text{WQA}}$  durch den Wärmeübertrager, die Förderhöhe  $H$  und der Differenzdruck  $\Delta p$  der Umwälzpumpe erfasst. Der Differenzdruck stellt sich aufgrund von Druckverlusten innerhalb des Wärmeübertragers und des

Rohrsystems des Primärkreislaufs ein. Die Höhe der Druckverluste im System ist maßgeblich von der Strömungsführung des Wärmeträgermediums abhängig. Mögliche Ursachen für erhöhte Druckverluste in Rohrsystemen liegen oftmals in Veränderungen des Fließquerschnitts durch Verengungen bzw. Aufweitungen oder in Strömungsumlenkungen bspw. an Rechteckprofilen. Überdies können auch an Rohreinläufen oder Absperr- und Regelorganen zusätzliche Druckverluste auftreten. Im Hinblick auf Wärmeübertragersysteme ist zudem der Druckabfall bei einer Verzweigung in verschiedene Teilströme von wesentlicher Bedeutung. Zudem sind die kontinuierlich auftretenden Reibungsverluste sowie die damit verbundene Energiedissipation zu berücksichtigen.

Im Anschluss an die Aufzeichnung der Pumpenkennlinie erfolgt die Ermittlung der strömungs- und wärmetechnischen Daten für die entsprechende Wärmequellenanlage anhand verschiedener Systemeinstellungen. Die Analyse des Wärmeentzugs basiert dabei auf den Temperaturmessungen von PT100-Fühlern, welche jeweils im Vorlauf und Rücklauf des Wärmeträgermediums installiert sind. Der Berechnung der Entzugsleistung liegt die allgemeine Formel des Wärmestroms zugrunde:

$$\dot{Q}_{th} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (5.1)$$

Dabei beschreibt  $\dot{m}$  [kg/s] den Massenstrom,  $c_p$  [kJ/(kg K)] die spezifische Wärmekapazität und  $\Delta T$  [K] die Temperaturdifferenz des Wärmeträgermediums, gemessen am Vorlauf und Rücklauf der Wärmequellenanlage. Der Massenstrom  $\dot{m}$  ist abhängig vom Volumenstrom  $Q_{WQA}$  [m<sup>3</sup>/s] und der temperaturabhängigen Dichte  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], wodurch (5.1) folgendermaßen umformuliert werden kann:

$$\dot{Q}_{th} = (Q_{WQA} \cdot \rho_{RL} \cdot c_{p,RL} \cdot T_{RL}) - (Q_{WQA} \cdot \rho_{VL} \cdot c_{p,VL} \cdot T_{VL}) \quad (5.2)$$

Zwei weitere Temperaturfühler befinden sich zudem im Strömungskanal unmittelbar vor und hinter der Wärmequellenanlage, um die direkte Abkühlung des Wassers durch den Wärmeentzug beurteilen zu können. Damit ein Wärmeübertrag von der Wärmequelle auf das Wärmeträgermedium stattfindet, ist eine entsprechende Temperaturspreizung erforderlich. Diese beschreibt die Differenz zwischen der Temperatur des Wärmeträgermediums am Vorlauf und der Temperatur der Wärmequelle, also des Wassers im Versuchsbecken, unmittelbar vor dem Wärmeübertrager. Die entsprechende Temperaturdifferenz wird ausschließlich über die Vorlauftemperatur des Wärmeträgermediums reguliert, da eine Temperaturregulierung der Wärmequelle aufgrund des großen Volumens und dem Standort im Außenbereich mit erheblichem Aufwand verbunden wäre. Daher wird das Wärmeträgermedium im Pufferbecken mithilfe der

Wärmepumpe bis zum Erreichen der geforderten Temperaturdifferenz abgekühlt. Die dabei entzogene Wärme wird über den Warmwasserspeicher und den Heizkörper im Heizkreislauf abgeführt. Im Betrieb der Wärmequellenanlage kommt es durch das zirkulierende Wärmeträgermedium zu einem kontinuierlichen Temperaturanstieg im Pufferbecken. Während einer Messung ist daher stets darauf zu achten, dass die Temperaturdifferenz den Toleranzbereich von  $\pm 0,1$  K nicht über- bzw. unterschreitet.

An jeder Wärmequellenanlage werden zur Erfassung der Wärmeentzugsleistung  $\dot{Q}_{th}$  zwei verschiedene Messreihen durchgeführt. Zunächst wird dabei der Betriebszustand der Anlage unter annähernd ruhenden Strömungsbedingungen bestimmt. In der zweiten Messreihe wird durch eine Erhöhung der Durchflüsse im Prüfstand der Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf die Wärmeentzugsleistung analysiert. Das methodische Vorgehen zur Erfassung der beiden Messreihen sowie die entsprechenden Systemeinstellungen sind nachfolgend näher beschrieben.

### **Messreihe 1 – Betriebszustand**

Die Ergebnisse aus Messreihe 1 dienen der Ermittlung einer Kennlinie der Wärmeentzugsleistung  $\dot{Q}_{th}$  ohne nennenswerten Einfluss der Fließgeschwindigkeit und repräsentieren somit den Betriebszustand der untersuchten Wärmequellenanlage. Lediglich durch eine schwache Strömung mit  $v_{Anström} \approx 0,1$  m/s wird die entstehende Kältefahne in unmittelbarer Nähe der Wärmequellenanlage davongetragen und verhindert so eine Beeinträchtigung der Messergebnisse aufgrund von lokalen Abkühlungseffekten des Wassers in diesem Bereich. Die Anströmgeschwindigkeit wird über die Drehzahl der Kreiselpumpe und die Einstellung der nachgeschalteten Absperrklappe reguliert.

Die Aufzeichnung der Kennlinie des Wärmeentzugs erfolgt für verschiedene Volumenströme des Wärmeträgermediums. Dafür wird die Drehzahl der Umwälzpumpe ausgehend von  $n_{max}$  schrittweise um 10 % bis  $n_{min}$  reduziert. Für jeden dieser Volumenströme werden die Messwerte der Temperaturfühler im Primärkreislauf und im Strömungskanal aufgezeichnet. Die Messdauer ist auf 150 Sekunden festgelegt, um auch bei geringen Volumenströmen eine vollständige Umwälzung des Wärmeträgermediums zwischen den beiden Messpunkten am Primärkreislauf zu garantieren. Die Kennlinie des Betriebszustands wird auf diese Weise für insgesamt vier verschiedene Temperaturspreizungen von  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 6$  K bis  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 1,5$  K in Schritten von 1,5 K erfasst.

## Messreihe 2 – Einfluss der Fließgeschwindigkeit

In Messreihe 2 wird der Einfluss der Anströmgeschwindigkeit am Wärmeübertrager auf die Wärmeentzugsleistung  $\dot{Q}_{th}$  untersucht, da diese Kenntnis für die Anwendung in Fließgewässern von wesentlicher Bedeutung ist. Dafür wird der Durchfluss im Strömungskanal  $Q_{WQ}$  schrittweise erhöht und anhand entsprechender Einstellungen der Kreislumpumpe und der Absperrklappe reguliert. Die Anströmgeschwindigkeiten werden so von 0,1 m/s bis auf 0,8 m/s in Schritten von 0,1 m/s erhöht. Zudem wird eine Messung bei  $Q_{WQ} = 203 \text{ l/s}$  durchgeführt, da dies dem Nenn-durchfluss der Kreislumpumpe entspricht. Zwar können die Anströmgeschwindigkeiten durch die Einstellungen am Prüfstand bereits verhältnismäßig präzise reguliert werden, dennoch sind diese stets mit Ungenauigkeiten und Schwankungen behaftet. Die exakte Fließgeschwindigkeit  $v \text{ [m/s]}$  für die Auswertung der Messergebnisse wird daher mithilfe des gemessenen Durchflusses  $Q_{WQ} \text{ [m}^3/\text{s]}$  im Strömungskanal anhand der Kontinuitätsgleichung bestimmt:

$$Q = v \cdot A \quad (5.3)$$

Die Fläche  $A \text{ [m}^2\text{]}$  entspricht der Austrittsöffnung des Tauchstrahls am Versuchsbecken. Durch die Umstellung von (5.3) ergibt sich die Anströmgeschwindigkeit damit zu:

$$v_{Anström} = \frac{Q_{WQ}}{A_{Austrittsöffnung}} \quad (5.4)$$

Auch in der Messreihe 2 werden die Messungen mit verschiedenen Temperaturspreizungen am Wärmeübertrager durchgeführt. Hier wird jedoch zusätzlich eine Regulierung des Durchflusses im Primärkreislauf vorgenommen. Die Messungen werden für die Kombinationen  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 6 \text{ K}/Q_{WQA,max}$ ,  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 4 \text{ K}/Q_{WQA,Ref}$  und  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 3,5 \text{ K}/Q_{WQA,min}$  durchgeführt. In der praktischen Anwendung werden Wärmeübertragersysteme nur selten mit maximalem Durchfluss betrieben, da dies aufgrund der auftretenden Druckverluste mit einem hohen Energieaufwand verbunden ist. Daher werden in dieser Messreihe die Entzugsleistungen auch bei geringerem Durchfluss im Wärmeübertrager analysiert. Der Referenzdurchfluss beträgt  $Q_{WQA,Ref} = 0,27 \text{ l/s}$  und entspricht dem Durchfluss, der bislang von jedem der bisher am Fachgebiet Wasserbau & Hydraulik der Technischen Universität Darmstadt untersuchten Wärmeübertragersysteme erreicht werden konnte.



### 5.2.2. Messtechnik

Für die Ermittlung der Wärmeentzugsleistung der unterschiedlichen Wärmequellenanlagen werden am Prüfstand die Parameter Temperatur, Druck, Durchfluss und Füllstand mithilfe verschiedener Messtechniken erfasst. Im Folgenden werden diese kurz vorgestellt und hinsichtlich ihrer Funktionsweise beschrieben.

#### **Pt100 Temperaturfühler**

Pt100 Temperaturfühler gehören zu den Widerstandsthermometern, deren Messprinzip auf der Änderung des elektrischen Widerstands in Abhängigkeit der Temperatur beruht. Die Basis eines Pt100 Temperaturfühlers bildet ein Platin-Widerstand mit einem festgelegten Nennwiderstand von 100  $\Omega$  bei einer Temperatur von 0 °C. Mit einer Zunahme der Temperatur steigt auch der Widerstand an. Der Sensor verfügt dabei über eine spezifische Widerstandskennlinie, welche für verschiedene Temperaturwerte den jeweiligen Ohm-Wert angibt. Diese Kennlinie sowie der Nennwiderstand des Pt100 sind in DIN EN 60751 definiert. (Gibietz 2019, o. S.) Das Messprinzip von Widerstandstemperaturfühlern basiert auf dem Ohm'schen Gesetz, welches den Zusammenhang zwischen der Stromstärke  $I$  [A], der Spannung  $U$  [V] und dem Widerstand  $R$  [ $\Omega$ ] beschreibt. Aufgrund der direkten Proportionalität von  $I$  und  $U$  ergibt sich demnach für den Widerstand  $R$  (Hering et al. 2016, S. 245 f.):

$$R = \frac{U}{I} \quad (5.5)$$

Dem Messelement des Pt100 Temperaturfühlers wird ein konstanter Messstrom zugeführt. Anhand der Spannungsänderung am Platin-Sensor erfolgt nach (5.5) die Berechnung des elektrischen Widerstands und daraus die Ableitung der entsprechenden Temperatur. Der angelegte Messstrom ist dabei so zu wählen, dass Messfehler aufgrund der Eigenerwärmung des Widerstands möglichst niedrig ausfallen. Pt100 Temperaturfühler werden in einem sehr großen Messbereich von -200 bis 850 °C eingesetzt und verfügen darüber hinaus über eine hohe Messgenauigkeit. (Jaruga 2019, o. S.) In DIN EN 60751 sind verschiedene Genauigkeitsklassen angegeben, welche eine Grenzabweichung von den tatsächlichen Temperaturwerten festlegen. Je nach Klasse beträgt diese  $\pm (0,1 + 0,0017 T)$  bis zu  $\pm (0,6 + 0,01 T)$ . Die Abweichungsgrenzen bestehen dabei in Abhängigkeit der Bauart des Widerstandsfühlers sowie dem Gültigkeitsbereich der zu messenden Temperaturwerte. Aufgrund des großen Temperaturbereichs, der hohen

Messgenauigkeit sowie der hohen Langzeitstabilität von Platin und einer Unempfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen sind Pt100 Temperaturfühler für den Einsatz am wärmeströmungstechnischen Prüfstand sehr gut geeignet.

### **Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät (MID)**

Die Durchflussmessung erfolgt sowohl am Primärkreislauf als auch am Strömungskanal anhand eines magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräts. MIDs können für alle Flüssigkeiten mit einer elektrischen Leitfähigkeit von mindesten  $5 \mu\text{S}/\text{cm}$  eingesetzt werden. Das Funktionsprinzip eines MID geht auf das Faraday'sche Induktionsgesetz zurück. Demnach induziert jede zeitliche Änderung eines magnetischen Flusses eine elektrische Spannung. Im Inneren eines MID sind zwei Feldspulen angeordnet und erzeugen ein konstantes Magnetfeld über den gesamten Messrohrquerschnitt. Wird das Magnetfeld von einer Flüssigkeit durchströmt, kommt es zu einer Separation der positiv und negativ geladenen Teilchen des Fluids an den gegenüberliegenden Rohrwandungen. Infolgedessen entsteht im Rohrquerschnitt eine elektrische Spannung, welche von zwei Messelektroden erfasst und gemessen wird. Diese Spannung besitzt eine direkte Proportionalität gegenüber der momentanen Fließgeschwindigkeit in der Rohrleitung. Mithilfe der bekannten Rohrquerschnittsfläche kann daraus das Durchflussvolumen abgeleitet werden. Um Störspannungen aus der Umgebung zu eliminieren, erfolgt der Aufbau des Magnetfeldes mit getaktetem Gleichstrom wechselnder Polarität. Damit werden ein stabiler Systemnullpunkt sowie eine Unempfindlichkeit gegenüber mehrphasigen Medien oder Inhomogenitäten gewährleistet. Das Messprinzip eines MID ist zudem von den physikalischen Eigenschaften des Fluids wie Druck, Dichte, Temperatur und Viskosität unabhängig und kann sogar zur Messung von feststoffbeladenen Flüssigkeiten eingesetzt werden. Außerdem verfügt es über einen großen Nennweitenbereich und ist somit an Rohrquerschnitten verschiedenster Durchmesser anwendbar. (Endress+Hauser 2019, o. S.)

### **Differenzdruckaufnehmer**

Wie bereits in Kap. 5.2.1 beschrieben, treten sowohl im Wärmeübertrager als auch im daran anschließenden Rohrsystem Druckverluste auf. Diese Druckverluste sind abhängig von der Strömungsführung des Wärmeträgermediums und verursachen einen erhöhten energetischen Aufwand beim Betrieb der Wärmequellenanlage. Für eine Beurteilung der auftretenden Druckverluste in den verschiedenen Wärmeübertragersystemen werden diese mithilfe eines Differenzdruckaufnehmers erfasst. Dieser ist zwischen dem Vor- und Rücklauf des Wärmeträgermediums



angebracht. Er befindet sich unmittelbar vor bzw. hinter dem Übergang zu den Spiralschläuchen, welche den Wärmeübertrager mit dem Rohrsystem des Primärkreislaufs verbinden. So wird sichergestellt, dass ausschließlich der Differenzdruck im Bereich des Wärmeübertragers gemessen wird und keine Beeinflussung durch Druckverluste im angrenzenden Rohrsystem auftritt.

Der Aufbau eines Differenzdruckaufnehmers besteht aus zwei Messkammern, welche durch ein druckempfindliches Element voneinander getrennt sind. Das Messelement besteht dabei meist aus einer Membran mit integriertem Dehnungsmessstreifen. Wird das System beidseitig über separate Druckanschlüsse mit einem Absolutdruck beaufschlagt, kommt es zu einer Durchbiegung der Membran. Diese Auslenkung wird erfasst und gilt als Maß für den Druckunterschied. (HBM 2019, o. S.) Der eingesetzte Differenzdruckaufnehmer am Prüfstand kann sowohl positive als auch negative Differenzdrücke aufnehmen und verfügt über einen Messbereich von  $\Delta p = 1 \text{ bar}$ .

### **Füllstandsensor**

Für das quasi-stationäre Verhalten des Tauchstrahls mit gleichmäßiger Geschwindigkeitsverteilung ist im Prüfbecken ein Wasserstand von 1,80 m vorgesehen (siehe Kap. 5.1). Um dies bei den laufenden Messungen zu gewährleisten, wird der Wasserstand im Prüfbecken über einen Ultraschallsensor kontinuierlich kontrolliert. Der Ultraschallsensor verwendet das Verfahren der Echo-Laufzeitmessung und erfasst somit berührungslos die Entfernung zu einem Objekt. Der Sensor sendet dabei ein Ultraschallsignal aus, welches am Messobjekt, in diesem Fall der Wasseroberfläche im Prüfstand, reflektiert wird. Über die Laufzeit des Schalls erfolgt anschließend die Berechnung der Entfernung, sofern sich das Objekt im Erfassungsbereich des Sensors befindet. Dieser liegt für das eingesetzte Gerät zwischen 200-2.000 mm. Durch eine interne Temperaturkompensation erreicht der Ultraschallsensor eine Messgenauigkeit von  $\pm 1 \%$ . (microsonic 2019, S. 1-3)

### **5.2.3. Geschwindigkeitsmessungen mit ADV**

Durch den unmittelbaren Einbau im Fließquerschnitt wird der Wärmeübertrager zu einem Hindernis in der Strömung. Für die Erfassung des Fließverhaltens bei der Umströmung des Wärmeübertragers werden Messungen der Fließgeschwindigkeiten mit einem Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) durchgeführt. Das Funktionsprinzip eines ADV basiert auf akustischen Signalen und gestattet somit eine kontaktlose Erfassung von dreidimensionalen Fließgeschwindig-

keiten. Die Erfassung erfolgt dabei in einem kleinen Messvolumen und mit einer hohen Abtastrate. Aufgrund dieser Eigenschaften werden ADVs häufig zur Messung von Fließgeschwindigkeiten und Turbulenzen bei Labor- und Felduntersuchungen eingesetzt. (BAW 2014, S. 1)

Das ADV gehört zu den akustischen Strömungsmessgeräten. Bei der Messung von Fließgeschwindigkeiten liegt dabei das physikalische Prinzip des Doppler-Effekts zugrunde. Der Doppler-Effekt beschreibt die Frequenzänderung eines akustischen Signals infolge einer Bewegung der Aussendungsquelle relativ zum Empfänger. Die Messung des Doppler-Effekts kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Das ADV sendet ein akustisches Signal mit bestimmter Frequenz in Form eines Pulses in den Wasserkörper. Dieses Signal wird von suspendierten Partikeln gestreut und teilweise reflektiert. Bei diesen Teilchen handelt es sich üblicherweise um gelöste Feststoffe, Mikroorganismen oder kleine Luftblasen. Es wird davon ausgegangen, dass die Partikel dabei mit der Fließgeschwindigkeit des Wassers fortbewegt werden. Aufgrund der Streuung und Reflektion des akustischen Signals kommt es zu einer Änderung der Frequenz proportional zur Geschwindigkeit der streuenden Partikel. Bei der Erfassung des rückgestreuten Signals kann anhand der veränderten Frequenz auf die Fließgeschwindigkeit des Wassers geschlossen werden. (Nortek AS 2017, S. 10 f.)

In Abbildung 5-2 sind der Aufbau und das Funktionsprinzip eines ADV mit der Messkopfgeometrie „down-looking“ dargestellt. Die ADV-Sonde verfügt über vier Empfänger, welche in einem  $30^\circ$ -Winkel zur Achse des Senders auf den Mittelpunkt des Messvolumens gerichtet sind (a). Jeder dieser Empfänger kann nur eine Komponente des dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektors erfassen. Diese entspricht der Richtung der Winkelhalbierenden zwischen den Sender- und Empfängerstrahlen (b). Da die Sonde vier Empfänger besitzt, wird die z-Komponente zweimal unabhängig voneinander erfasst. Aus den Messungen der verschiedenen Empfänger kann anschließend der dreidimensionale Geschwindigkeitsvektor abgeleitet werden.

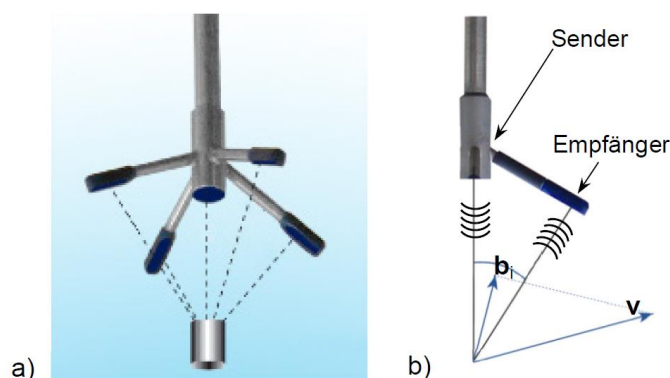


Abbildung 5-2: a) ADV-Sonde mit Messvolumen und b) Funktionsprinzip (BAW 2014, S. 2)

Im Grunde ermittelt das ADV die Fließgeschwindigkeit jedoch nicht durch eine direkte Messung der Frequenzänderung, sondern durch die Messung der Phasenverschiebung, da diese eine höhere Genauigkeit aufweist. Dafür werden zwei Pulse mit bekanntem zeitlichen Versatz ausgesendet und bei der Rückstreuung dessen Änderung gemessen. Der Umfang des zeitlichen Versatzes hängt von der maximal messbaren Fließgeschwindigkeit ab, weshalb diese bereits im Vorfeld der Messungen anzugeben ist. Übersteigt die Fließgeschwindigkeit diese Vorgabe, entsteht eine Phasenverschiebung, die über eine volle Periode hinausgeht. Dies wird durch das Gerät jedoch nicht erkannt und es resultiert eine Verfälschung der Messwerte. (BAW 2014, S. 1-3)

Die Qualität der Messungen kann anhand verschiedener Kriterien beurteilt werden. Als wichtigstes Merkmal gilt dabei der Correlation-Wert. Dieser gibt die Übereinstimmung der beiden Pulse an, die für die Bestimmung der Phasenverschiebung erfasst werden. Da das Puls-Paar mit zeitlichem Versatz auf das Messvolumen trifft, ist es möglich, dass zwischen der Ankunft der beiden Pulse eine Veränderung der Geschwindigkeitsverhältnisse stattfindet. Infolgedessen werden die beiden Pulse nicht in gleichem Maße reflektiert, wodurch eine Abweichung des zweiten Pulses vom ersten entsteht. Die Messungen sind damit fehlerbehaftet und die Messunsicherheit steigt. Die Korrelation der rückgestreuten Signale wird daher für jede Messung während der Ermittlung der Phasenverschiebung mitberechnet und als Correlation-Wert angegeben. Kommt es zwischen dem Auftreffen der beiden Pulse zu starken Veränderungen der Geschwindigkeitsverhältnisse im Messvolumen, besteht nur eine geringe Übereinstimmung der reflektierten Pulse und der Correlation-Wert sinkt. Je größer demnach der Correlation-Wert, desto zuverlässiger erfolgt die Bestimmung der entsprechenden Geschwindigkeitskomponente. Mögliche Gründe für niedrige Correlation-Werte sind neben den schnellen Schwankungen der Geschwindigkeit auch Störsignale oder eine zu geringe Anzahl an Rückstreupartikeln im Wasser. Ein weiteres Qualitätsmerkmal der Messwerte stellt der SNR-Wert (Signal-to-noise ratio) dar. Dieser gibt die Stärke des empfangenen Signals gegenüber dem Hintergrundrauschen an. Dabei ist zu beachten, dass das Gerät das Hintergrundrauschen nur einmalig zu Beginn des Messbetriebs erfasst. In der Literatur werden Werte von mindestens 15 dB empfohlen, im Optimalfall werden jedoch Werte über 20 dB erreicht. (BAW 2014, S. 3 f)

Zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse an den unterschiedlichen Wärmequellenanlagen wurden mithilfe des ADV die Fließgeschwindigkeiten unmittelbar vor und nach dem Wärmeübertrager bei konstanter Anströmgeschwindigkeit erfasst. Die Verteilung der Messpunkte er-

folgte dabei über die gesamte Fließhöhe bzw. Fließbreite entlang einer mittig zum Einlaufquerschnitt gelegenen, senkrechten bzw. horizontalen Achse. Die kritischen Abstände zu reflektierenden Oberflächen wie bspw. Wände oder Sohle wurden dabei eingehalten.

Als Abtastrate wurde ein Wert von 200 Hz festgelegt, was einer Erfassung von 200 Messwerten pro Sekunde entspricht. Die maximal messbare Fließgeschwindigkeit, auch bezeichnet als Nominal Velocity Range, wurde außerdem auf den höchstmöglichen Wert von  $\pm 4$  m/s eingestellt, um auch turbulenzbedingte Fluktuationen ohne Fehlerbehaftung erfassen zu können.

### 5.3 Untersuchungen am Wärmeübertragersystem „TwinSheet“

Das Wärmeübertragersystem „TwinSheet“ wird im Rahmen dieser Arbeit lediglich im Hinblick auf seine Eignung für die praktische Anwendung in Fließgewässern überprüft. Anhand der Messergebnisse erfolgt zudem ein Vergleich mit den Wärmeübertragersystemen „Stegplattenmuster“ und „Spiralmuster“. Für diese beiden Modelle wurden die Wärmeentzugsleistung und der allgemeine Betriebszustand bereits im Vorlauf dieser Arbeit von Borchardt (2019a, o. S.) erfasst.

Der Aufbau und die wesentlichen Produktdaten des „TwinSheet“-Musters sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Das untersuchte System besteht aus insgesamt zehn parallelen Platten, welche in zwei hintereinander liegenden Blöcken symmetrisch und in Strömungsrichtung angeordnet sind. Die Führung des Wärmeträgermediums in den einzelnen Platten erfolgt bifilar, was einer gegenläufigen Spiralanordnung entspricht.

Tabelle 5-1: Produktdaten TwinSheet-Muster (Borchardt 2019c, o. S.)

TwinSheet-Muster			
Wärmeaustauschfläche		33027,1 cm²	
Fließlänge Wärmeträgermedium		136,6 m	
Wanddicke		0,55-0,65 mm	
Material		PE-HD	
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Material},0^{\circ}\text{C}}$		0,44 W/(m·K)	
Q <sub>WQA,max</sub>	0,450 l/s	Q <sub>WQA,min</sub>	0,135 l/s



Die Untersuchungen am „TwinSheet“-Muster wurden anhand der in Kap. 5.2.1 beschriebenen Methodik durchgeführt. Die Kennlinie der Umwälzpumpe für das „TwinSheet“-Muster ist in Anhang III zu finden. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Messreihen 1 und 2 beschrieben und den entsprechenden Werten der Wärmeübertragersysteme „Stegplattenmuster“ und „Spiralmuster“ gegenübergestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit wird dabei die flächenbezogene Wärmeentzugsleistung  $\dot{q}_{th}$  [kW/m<sup>2</sup>] herangezogen. Die absoluten Entzugsleistungen  $\dot{Q}_{th}$  [kW] der Messreihen 1 und 2 für die jeweiligen Temperaturspreizungen am Wärmeübertrager sind in Anhang IV dargestellt.

Abbildung 5-3 zeigt die Ergebnisse aus Messreihe 1 für den Betriebszustand der drei verschiedenen Wärmeübertragersysteme. Für eine verbesserte Übersichtlichkeit sind hier repräsentativ die Werte für die Temperaturspreizungen  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 6$  K und  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 3$  K aufgeführt.



Abbildung 5-3: Relative Entzugsleistung verschiedener Wärmeübertragersysteme

Bei gleichem Volumenstrom  $Q_{WQA}$  im Wärmeübertrager zeigen die Kennlinien der drei Systeme grundsätzlich einen ähnlichen Verlauf. Demnach weist in diesem Bereich jeder der Wärmeübertrager eine vergleichbare Wärmeentzugsleistung auf. Das „TwinSheet“-Muster zeichnet sich gegenüber den anderen Wärmeübertragersystemen jedoch insbesondere durch einen höheren Maximaldurchfluss  $Q_{WQA,max}$  aus und ermöglicht damit insgesamt auch höhere Entzugsleistungen. Aus diesem Grund werden für den Vergleich der Ergebnisse aus Messreihe 2 ausschließlich die Werte für  $Q_{WQA,Ref}$  herangezogen. Wie in Kap. 5.2.1 beschrieben, handelt es sich dabei um den

Referenzdurchfluss von 0,27 l/s, da dieser von jedem der drei Wärmeübertragersysteme erreicht werden kann. In Abbildung 5-4 sind die jeweiligen Messergebnisse für die Einstellung  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 4 \text{ K}/Q_{WQA,Ref}$  dargestellt.

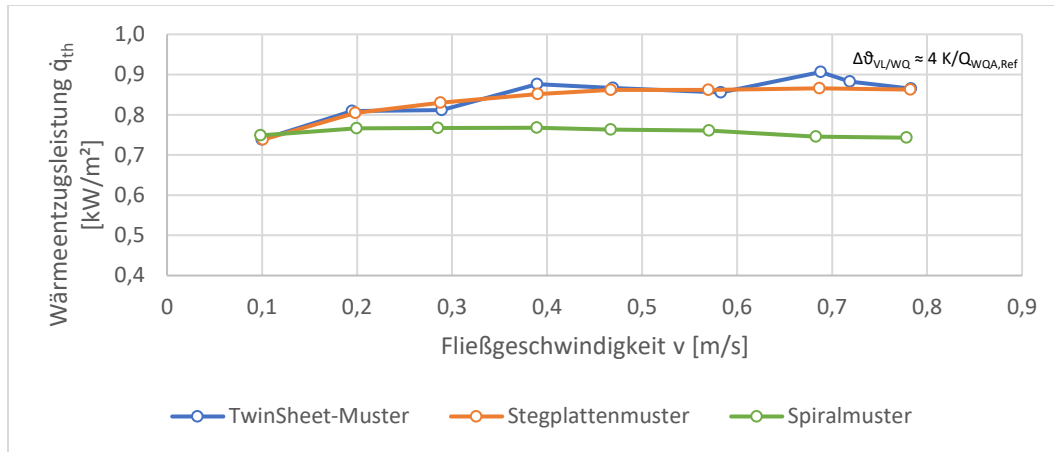


Abbildung 5-4: Relative Entzugsleistung verschiedener Wärmeübertragersysteme für  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 4 \text{ K}/Q_{WQA,Ref}$

Auch hier entspricht die relative Entzugsleistung  $\dot{q}_{th}$  des „TwinSheet“-Musters näherungsweise der des „Stegplattenmusters“ und zeigt ein ähnliches Verhalten bei steigenden Fließgeschwindigkeiten. Lediglich das „Spiralmuster“ weist hier eine geringfügige Abweichung auf.

Die Fließgeschwindigkeit zwischen den wärmeübertragenden Platten wirkt sich jedoch nicht nur auf die Wärmeentzugsleistung aus, sondern auch auf die Ausprägung von Foulingprozessen. In Kap. 3.3 wurde veranschaulicht, dass mit steigenden Fließgeschwindigkeiten der Vorgang des Foulings abnimmt bzw. verlangsamt wird. Für die Erfassung der Strömungsverhältnisse wurden die Fließgeschwindigkeiten unmittelbar vor (Position 1) und nach (Position 2) dem Wärmeübertrager mittels eines ADV gemessen. Der Messvorgang wurde entsprechend der in Kap. 5.2.3 beschriebenen Methodik durchgeführt. Der Volumenstrom im Strömungskanal beträgt dabei konstant  $Q_{WQ} = 203 \text{ l/s}$ , wodurch nach (5.3) eine Anströmgeschwindigkeit von 0,72 m/s vorliegt. Für das „TwinSheet“-Muster liegen die Messpunkte entlang einer vertikalen Achse durch den Mittelpunkt des Einlaufquerschnitts. Abbildung 5-5 zeigt die gemessenen Fließgeschwindigkeiten an den verschiedenen Messpunkten und veranschaulicht damit die Umströmung des Wärmeübertragers. Das zugehörige Messraster und die Ergebnisse der einzelnen Messpunkte sind in Anhang VII enthalten. Die Bezeichnung der Messpunkte setzt sich aus der jeweiligen Position und dem Abstand vom Mittelpunkt in cm zusammen. Anhand der Darstellung ist ein Verringerung der Fließgeschwindigkeit im Bereich des Wärmeübertragers deutlich erkennbar. Der größte Geschwindigkeitsabfall findet dabei in der Mitte des Wärmeübertragers

statt. Die erhöhten Fließgeschwindigkeiten oberhalb und unterhalb des Wärmeübertragers weisen auf eine Umströmung des Systems hin. Bei der Durchströmung des „TwinSheet“-Musters kommt es demnach zu einer deutlichen Verringerung der Fließgeschwindigkeiten, wodurch günstige Voraussetzungen für Sedimentation und Biofilmbildung geschaffen werden und damit eine Beeinträchtigung der Wärmeentzugsleistung besteht.

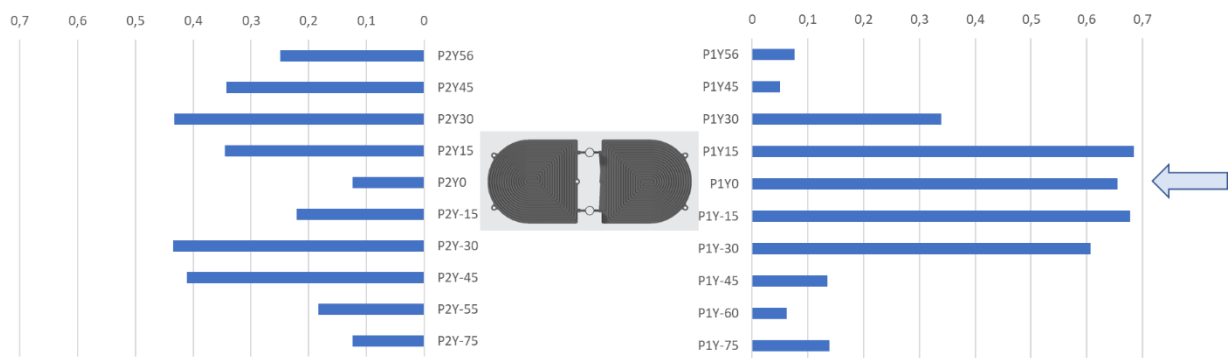


Abbildung 5-5: Vertikale Fließgeschwindigkeiten in [m/s] am „TwinSheet“-Muster

Die Untersuchungen am „TwinSheet“-Muster haben gezeigt, dass dieses Wärmeübertragungssystem sehr gut für eine praktische Anwendung in Fließgewässern geeignet ist. Aufgrund des höheren Durchflussvermögens des Wärmeträgermediums ist es den übrigen bisher geprüften Wärmeübertragungssystemen vorzuziehen. In der Praxis erfolgt der Einsatz von Wärmequellenanlagen meist nicht mit maximalem Durchfluss, da diese Betriebsweise mit hohen Druckverlusten und somit einem übermäßigen energetischen Aufwand verbunden ist. Wie in Abbildung 5-3 zu erkennen ist, erreicht das „TwinSheet“-Muster bei einer Pumpenleistung von etwa  $n_{UWP} \approx 50 \%$  bereits die maximale Wärmeentzugsleistung des „Stegplattenmusters“ und des „Spiralmusters“. Für das „TwinSheet“-Muster ist demnach bei gleicher Entzugsleistung ein geringerer Energieeinsatz erforderlich. Das System zeichnet sich somit durch eine effizientere Betriebsweise aus und ermöglicht damit einen verbesserten Wärmeentzug.

## 5.4 Auswirkungen von Biofouling auf die Wärmeentzugsleistung


In Kap. 3.2.1 wurde die Beeinflussung der Wärmeentzugsleistung durch die Bildung von Biofilmen an Wärmeübertragungsflächen näher betrachtet. Um die Auswirkungen dieser Verschmutzungsform auch für Wärmequellenanlagen in natürlichen Gewässern beurteilen zu können, wurden dazu im Rahmen dieser Arbeit experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Für die Versuche kamen die Wärmeübertragungssysteme „Spiralmuster“ und „Stegplattenmuster“ zum



Einsatz. Um die Beeinträchtigung der Entzugsleistung aufgrund der Biofilmbildung an den beiden Wärmeübertragern beurteilen zu können, werden die Messergebnisse im Anschluss mit den zuvor von Borchardt (2019a, o. S.) erfassten Daten des unverschmutzten Zustands verglichen. Die Produktdaten sowie der Aufbau der verwendeten Wärmeübertragersysteme sind nachfolgend in den Tabellen 5-2 und 5-3 dargestellt. Das „Stegplattenmuster“ ist aus zehn rechteckigen Platten aufgebaut, welche parallel angeordnet sind und senkrecht durchströmt werden. Die Führung des Wärmeträgermediums im Inneren der Platten verläuft mäanderförmig.

Tabelle 5-2: Produktdaten Stegplattenmuster (Borchardt 2019c, o. S.)


Stegplattenmuster			
Wärmeaustauschfläche		23.541 cm <sup>2</sup>	
Fließlänge Wärmeträgermedium		151,52 m	
Wanddicke		0,65 mm	
Material		PP Copolymer	
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Material}, 0^\circ\text{C}}$		0,22 W/(m·K) (VDI 2013, S. 648)	
$Q_{\text{WQA,max}}$	0,280 l/s	$Q_{\text{WQA,min}}$	0,089 l/s



Das „Spiralmuster“ besteht aus fünf spiralförmig angeordneten Schläuchen, die vom Wärmeträgermedium durchströmt werden. Die Anströmung des „Spiralmusters“ erfolgt frontal, also senkrecht zu der Schlauchanordnung.

Tabelle 5-3: Produktdaten Spiralmuster (Borchardt 2019a, o. S.)

Spiralmuster			
Wärmeaustauschfläche		38.000 cm <sup>2</sup>	
Fließlänge Wärmeträgermedium		151,2 m	
Wanddicke		0,8 mm	
Material		Polyethylen	
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Material}, 0^\circ\text{C}}$		0,44 W/(m·K)	
$Q_{\text{WQA,max}}$	0,270 l/s	$Q_{\text{WQA,min}}$	0,076 l/s



Die eingesetzten Wärmeübertrager wurden für die Ablagerungsbildung in einen speziell dafür angelegten Behälter eingebracht (siehe Abbildung 5-6). In diesem Behälter wurden die erforderlichen Rahmenbedingungen für eine Anlagerung von Mikroorganismen und das darauffolgende Wachstum von Biofilmen geschaffen. Dafür erfolgte die Füllung des Behälters zunächst mit Frischwasser. Nach Flemming (1994, S. 2) sind die wesentlichen Voraussetzungen für die Entwicklung und das Wachstum von Biofilmen eine ausreichende Verfügbarkeit von Mikroorganismen und Nährstoffen. Daher wurde der Inhalt des Behälters mit Wasser aus dem nahegelegenen Darmbach angereichert. Dabei wurden auch Sohlsubstrat und Kleinstlebewesen sowie organisches Material in Form von Falllaub und Pflanzenteilen dem Behälter zugeführt. Der Darmbach ist dem Fließgewässertyp „Grobmaterialreiche, silikatische Mittelgebirgsbäche“ (Typ 5) zuzuordnen und weist im Bereich der Entnahmestelle einen mäßigen ökologischen Zustand auf (Banning und Helsper 2010, S. 29). Die Zusammensetzung im Aufwuchsbehälter wurde also nicht nur auf die optimalen Bedingungen für das Wachstum von Biofilmen ausgerichtet, sondern repräsentiert zugleich auch die Verhältnisse eines natürlichen Gewässers. Aus diesem Grund wurde der Behälter auch im Außenbereich platziert, um natürliche Umgebungseinflüsse wie wechselnde Temperatur- und Witterungsverhältnisse zu berücksichtigen. Auf diese Weise konnten außerdem die Verdunstungsverluste im Behälter durch regelmäßige Niederschlagsereignisse ausgeglichen werden. Neben der ausreichenden Verfügbarkeit von Mikroorganismen und Nährstoffen ist für das Wachstum von Biofilmen auch ein ausreichendes Sauerstoffdargebot von wesentlicher Bedeutung. Daher wurden im Behälter regelmäßig durch manuelle Rührbewegungen Verwirbelungen und Turbulenzen erzeugt, um einerseits eine ausreichende Sauerstoffzufuhr zu gewährleisten und andererseits die Strömungsverhältnisse innerhalb eines Fließgewässers ansatzweise nachzubilden.

Die Bildungsrate von Biofilmen hängt zunächst von der Anzahl an Mikroorganismen im Wasser ab. Nach der Anlagerung der Mikroorganismen und der Ausbildung von Biofilmstrukturen an der Oberfläche wird das weitere Wachstum jedoch weniger durch die Anlagerung neuer Zellen, sondern vielmehr durch die Vermehrung der Mikroorganismen innerhalb des Biofilms gesteuert. Dieser Vorgang ist jedoch auf eine ausreichende Verfügbarkeit von Nährstoffen angewiesen. Daher wurde dem Behälter über den Zeitraum der Biofilmerzeugung hinweg wiederholt zusätzliches organisches Material in Form von Totholz, Zweigen, Falllaub und Humus zugeführt. Eine Übersicht über die chronologische Abfolge der unterschiedlichen Handlungsschritte bei der Erzeugung der Biofilme bis hin zu den Messungen ist in Anhang II dargestellt.









Abbildung 5-6: „Stegplattenmuster“ und „Spiralmuster“ im Aufwuchsbehälter zur Biofilmbildung  
(Mauerwerkssteine dienen der zusätzlichen Stabilität und verhindern ein Aufschwimmen der luftgefüllten Wärmeübertrager)

Der Verbleib der beiden Wärmeübertrager in diesem Behälter betrug für das Stegplattenmuster insgesamt ca. 6 Wochen und für das Spiralmuster ca. 8 Wochen. Die Anlagerung von Partikeln an den wärmeübertragenden Flächen war bereits nach wenigen Tagen sichtbar und auch die schleimige Konsistenz der für Biofilme typischen EPS konnte festgestellt werden. Nach Ablauf der 6 bzw. 8 Wochen im Aufwuchsbehälter zeigten die Wärmeübertrager deutliche Anzeichen von Biofilmbildung. Der optische Verlauf der Ablagerungsbildung in diesem Zeitraum ist in Tabelle 5-4 dargestellt. Nach dem in Kap. 3.2.1 beschriebenen Ablauf der Biofilmbildung konnten die vorhandenen Ablagerungen nach 6 Wochen auf das Stadium (D) eingestuft werden, da die Entwicklung von dreidimensionalen Strukturen bereits mit bloßem Auge erkennbar war. Auch gegenüber mechanischen Scherkräften zeigte der Biofilm in diesem Stadium eine beträchtliche Resistenz. Es ist davon auszugehen, dass der biologische Bewuchs bei weiterhin ausreichender Verfügbarkeit von Nährstoffen und Feuchtigkeit ein noch größeres Ausmaß erreichen könnte.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen an den verschmutzten Wärmeübertragern dargestellt und für eine Einschätzung der Auswirkungen des Biofilms mit den Messdaten des unverschmutzten Zustands verglichen.

Tabelle 5-4: Optische Ablagerungsbildung an den Wärmeübertragungsflächen im zeitlichen Verlauf

Stegplattenmuster	Spiralmuster
Unverschmutzter Zustand	
	
Zustand nach 3 Wochen	
	
Zustand nach 6 Wochen	
	



## Stegplattenmuster

Die Untersuchungen am Wärmeübertragersystem „Stegplattenmuster“ im mit Biofilm belasteten Zustand wurden anhand des in Kap. 5.2.1 beschriebenen Vorgehens durchgeführt. Durch die Anwendung der beschriebenen Methodik unter Einhaltung der vorgegebenen Parameter wird somit eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse sichergestellt. Lediglich der maximale Durchfluss des Wärmeträgermediums  $Q_{WQA,max} = 0,28 \text{ l/s}$  bei einer Leistung der Umwälzpumpe von  $n_{UWP,max} = 100 \%$  konnte nicht vollständig erreicht werden. Die verringerte Durchflussmenge ist größtenteils auf einen Verbleib von Luft im Primärkreislauf zurückzuführen. Eine vollständige Entlüftung des Systems konnte unter den gegebenen Bedingungen mit vertretbarem Aufwand jedoch nicht erreicht werden. Ein weiterer Grund für den geringeren Maximaldurchfluss liegt in der unterschiedlichen Temperatur des Wärmeträgermediums bei den Messvorgängen. Während die Untersuchungen des unverschmutzten Zustands in den Sommermonaten durchgeführt wurden, bestand bei den Messungen mit Biofilm aufgrund der niedrigen Außentemperaturen die Notwendigkeit einer deutlich niedrigeren Temperatur des Wärmeträgermediums, um die geforderte Temperaturspreizung am Wärmeübertrager gewährleisten zu können. Mit sinkender Temperatur des Wärmeträgermediums konnte eine weitere Abnahme des maximalen Durchflusses im Primärkreislauf beobachtet werden. Die Gründe liegen dafür zum einen in einer Querschnittsverengung der Rohrleitungen, zum anderen in der zunehmenden Viskosität des Wärmeträgermediums, in diesem Fall Wasser, bei niedrigen Temperaturen. Zudem fanden mit hoher Wahrscheinlichkeit aufgrund von vorherigen Nutzungen bereits Foulingvorgänge im Inneren des Wärmeübertragers (siehe Kap. 3.2) statt. Die Bildung von Ablagerungen würde somit zu einer weiteren Dezimierung des Fließquerschnitts und einem erhöhten Reibungswiderstand an der Rohrwandung führen. Da die Wärmeentzugsleistung jedoch für verschiedene Einstellungen von  $n_{UWP}$  gemessen und anhand der entsprechenden Durchflüsse  $Q_{WQA}$  beurteilt wird, stellt der abweichende Maximaldurchfluss im Primärkreislauf keine Einschränkung in der Vergleichbarkeit dar. Die Messungen wurden mit einem maximalen Durchfluss von  $Q_{WQA} = 0,273 \text{ l/s}$  durchgeführt, was bei ursprünglichem Durchflussvermögen einer Pumpenleistung von annähernd  $n_{UWP} = 98 \%$  entspricht. Die entsprechende Kennlinie der Umwälzpumpe für die Messungen des Zustands mit Biofilmbewuchs ist in Anhang III dargestellt.

In Messreihe 1 wurde der Betriebszustand des Wärmeträgersystems „Stegplattenmuster“ in Abhängigkeit des Volumenstroms des Wärmeträgermediums  $Q_{WQA}$  für die in Kap. 5.2.1 vorgegebenen Temperaturspreizungen von  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 6 \text{ K}$  bis  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 1,5 \text{ K}$  erfasst. In der nachstehenden Abbildung 5-7 sind die jeweiligen Wärmeentzugsleistungen  $\dot{Q}_{th}$  für den unverschmutzten

(blau) und den mit Biofilm belasteten Zustand (rot) dargestellt. Die vollständigen Messdaten und Berechnungen am Stegplattenmuster sind in Anhang V dargestellt.

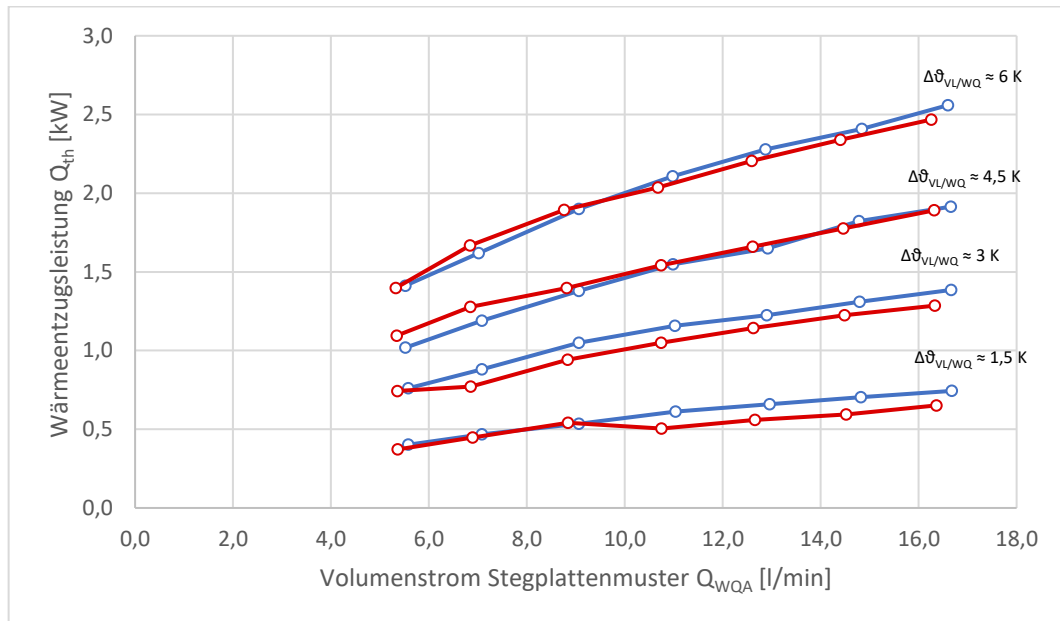


Abbildung 5-7: Ergebnisse Messreihe 1 „Stegplattenmuster“ (blau: unverschmutzter Zustand; rot: mit Biofilmbewuchs)

Anhand der Kennlinien lässt sich eine Beeinträchtigung der Wärmeentzugsleistung infolge des Biofilmbewuchses deutlich erkennen. Für die Messungen mit den Temperaturspreizungen von 6 K, 3 K und 1,5 K liegt die Entzugsleistung sichtlich unter dem zuvor in sauberem Zustand erreichten Werten. Lediglich bei 4,5 K verlaufen die Kennlinien näherungsweise gleich. Hier ist jedoch anzumerken, dass die Messungen des sauberen Zustands bei einer Temperaturspreizung von nur 4,3 K durchgeführt wurden. Es zeigt sich also, dass hier der Einfluss des Biofilms in etwa einer Verringerung der Temperaturspreizung von 0,2 K entspricht.

Diese Erkenntnisse werden durch die Ergebnisse der Messreihe 2 zum Einfluss der Fließgeschwindigkeit bestätigt. Wie in Abbildung 5-8 zu erkennen, liegen auch hier die Wärmeentzugsleistungen für den verschmutzten Zustand (rot) mehrheitlich unterhalb der Messwerte des sauberen Wärmeübertragers (blau). Es ist jedoch zu beachten, dass für  $\Delta\theta_{VL/WQ} \approx 3,5 \text{ K}/Q_{WQA,min}$  die Messungen bei einer Temperaturspreizung von 3,7 K durchgeführt wurden und die Abweichung deshalb möglicherweise zu hoch ausfällt. Messwerte, die auf der blauen Kennlinie oder auch darüber liegen, sind auf die unterschiedlichen Bedingungen bei der Aufnahme der Messungen zurückzuführen. Bei den Messungen des verschmutzten Zustands zeigen sich im Gegenteil zu den Messungen am sauberen Wärmeübertrager keine Regelmäßigkeiten in der Kurvenform.

Diese Unregelmäßigkeiten sind durch die Unbeständigkeit der Temperaturspreizung  $\Delta\vartheta_{VL/WQ}$  begründet, da sich die Temperatur des Wärmeträgermediums im Pufferbecken stets an seine Umgebungstemperatur anpasst. In einer Messreihe musste diese daher oftmals neu eingestellt werden. Diese Korrekturen fanden bei den Messungen des sauberen Zustands nicht statt.

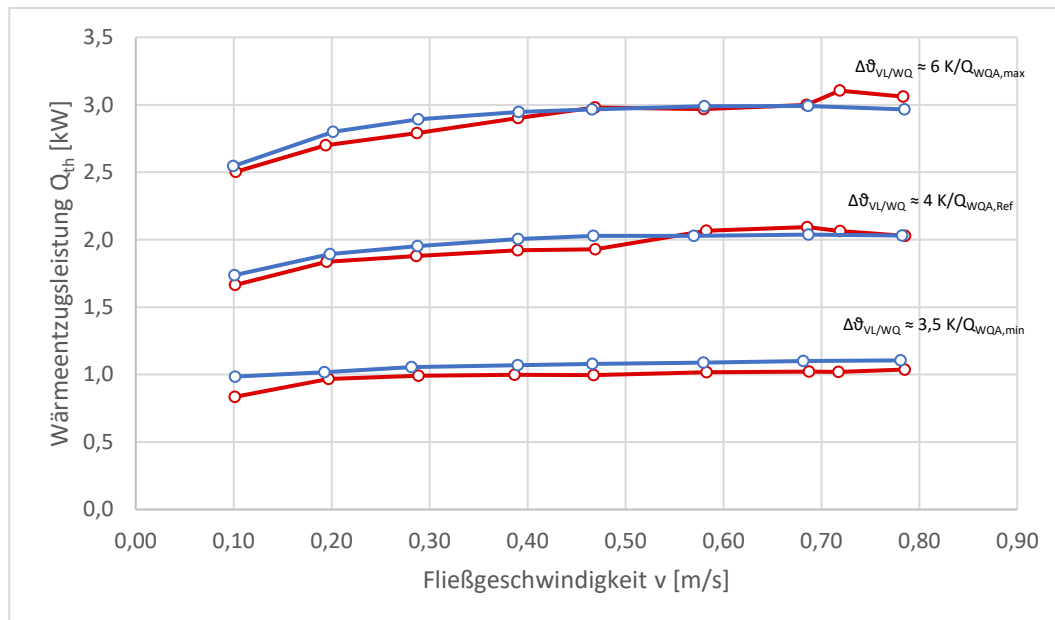


Abbildung 5-8: Ergebnisse Messreihe 2 „Stegplattenmuster“ (blau: unverschmutzter Zustand; rot: mit Biofilmbewuchs)

Insgesamt zeichnet sich bei den Untersuchungen am „Stegplattenmuster“ eine eindeutige Beeinflussung der Wärmeentzugsleistung durch den biologischen Bewuchs ab. Die Abweichung ist gegenüber der absoluten Entzugsleistung jedoch verhältnismäßig gering, die maximal gemessene Differenz beträgt 0,1 kW.

Die Untersuchungen der Messreihe 2 haben zudem eine hohe Resistenz des Biofilms gegenüber strömungsbedingten Scherkräften gezeigt. Nach den Versuchsdurchführungen zeigten sich am „Stegplattenmuster“ keine sichtbaren Ablösungserscheinungen des Biofilms. Die maximale Anströmgeschwindigkeit am Wärmeübertrager betrug 0,8 m/s.

Des Weiteren wurden Messungen der Fließgeschwindigkeiten vor (Position 1) und nach (Position 2) dem Wärmeübertrager durchgeführt, um die Durch- bzw. Umströmung des „Stegplattenmusters“ zu erfassen. Die Messpunkte lagen dabei auf einer horizontalen Achse durch den Mittelpunkt des Einlaufquerschnitts. Das Messraster und die Geschwindigkeitswerte an den einzelnen Messpunkten sind in Anhang VII dargestellt.



Die Bezeichnung der Messpunkte ist zusammengesetzt aus der jeweiligen Position sowie dem horizontalen Abstand zum Mittelpunkt des Einlaufquerschnitts. Abbildung 5-9 veranschaulicht diese Messergebnisse und zeigt eine Geschwindigkeitsreduktion nach der Durchströmung des Wärmeübertragers, wobei diese mittig am stärksten ausgeprägt ist. In den übrigen Bereichen des Wärmeübertragers ist der Geschwindigkeitsabfall jedoch weniger stark ausgeprägt, was insgesamt auf eine gute Durchströmung des „Stegplattenmusters“ hindeutet.

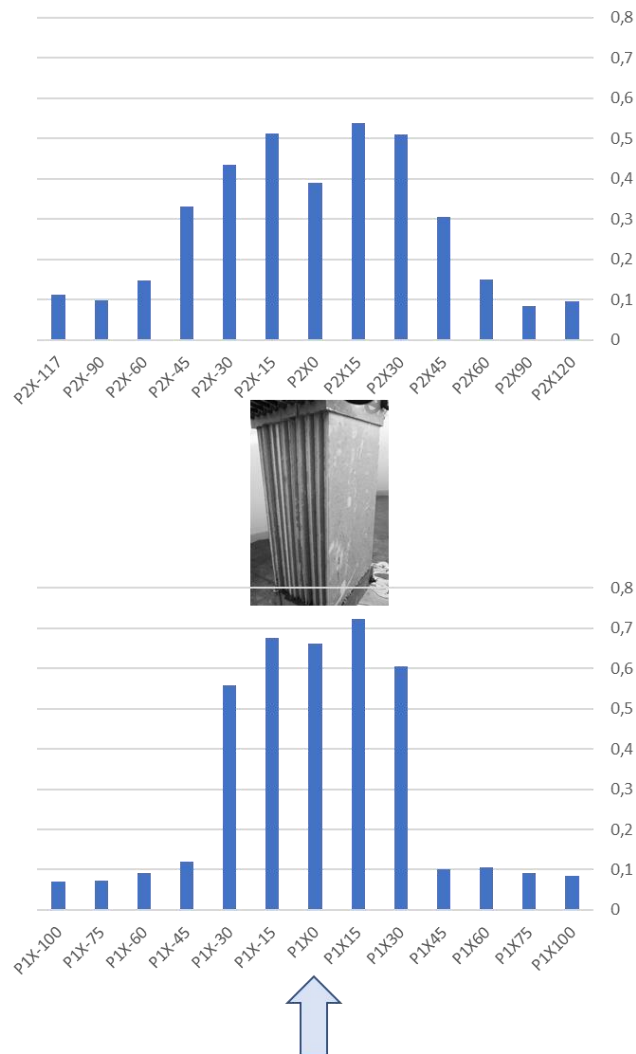


Abbildung 5-9: Horizontale Fließgeschwindigkeiten in [m/s] am „Stegplattenmuster“

### Spiralmuster

Für das Wärmeübertragersystem „Spiralmuster“ wurden die Untersuchungen des verschmutzten Zustands ebenfalls anhand des methodischen Vorgehens aus Kap. 5.2.1 durchgeführt. Jedoch fanden die Messungen auch hier mit einem verringerten Maximaldurchfluss gegenüber

vorherigen Messungen statt. Trotz einiger Umbau- und Optimierungsmaßnahmen an der Versuchsanlage konnte keine vollständige Entlüftung im Rohrsystem des Primärkreislaufs erreicht werden. In Kombination mit den bereits beschriebenen Effekten der Durchflussreduzierung aufgrund von niedrigen Temperaturen und möglichen Ablagerungsbildungen im Inneren des Systems wurde ein maximaler Durchfluss von  $Q_{WQA} = 0,25 \text{ l/s}$  erreicht. Dies entspricht gegenüber dem ursprünglichen Maximaldurchfluss von  $Q_{WQA,max} = 0,27 \text{ l/s}$  in etwa einer Leistung der Umwälzpumpe von  $n_{UWP} = 94 \%$ . Die Kennlinie der Umwälzpumpe für die Messungen mit Biofilmbewuchs ist in Anhang III dargestellt.

Zum Zeitpunkt der Untersuchungen am „Spiralmuster“ herrschten sehr niedrige Außentemperaturen im einstelligen Bereich. Eine Temperaturspreizung von  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 6 \text{ K}$  war unter diesen Umständen nicht realisierbar, da das Wasser als Wärmeträgermedium durch die Wärmepumpe im Pufferbecken nicht unter  $4,8 \text{ °C}$  abgekühlt werden konnte. Andernfalls bestand eine Vereisungsgefahr am Plattenwärmeübertrager zwischen Primärkreislauf und Solekreislauf der Wärmepumpe. Die übrigen Messungen wurden jedoch entsprechend der Vorgaben in Kap. 5.2.1 absolviert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-10 dargestellt. Für den Vergleich mit vorherigen Messungen am unverschmutzten Zustand stehen hier jedoch nur die Messwerte für  $\Delta\vartheta_{VL/WQ} \approx 3 \text{ K}$  zur Verfügung. Die vollständigen Messdaten und Berechnungen am Spiralmuster sind in Anhang VI dargestellt.

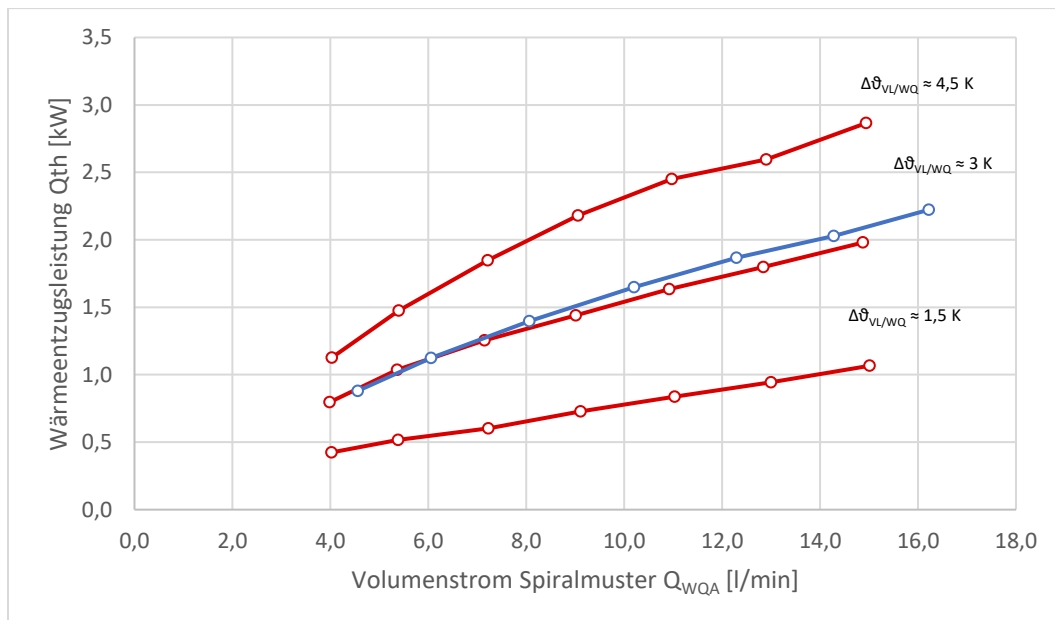


Abbildung 5-10: Ergebnisse Messreihe 1 "Spiralmuster" (blau: unverschmutzter Zustand; rot: mit Biofilmbewuchs)

Der Vergleich mit den Messwerten des unverschmutzten Zustands macht auch für das „Spiralmuster“ eine verringerte Wärmeentzugsleistung aufgrund des Biofilmbewuchses deutlich. Zwar steht hier nur eine einzige Vergleichsreihe zur Verfügung, da die Kennlinien jedoch insgesamt eine gewisse Regelmäßigkeit in Abstand und Kurvenform aufweisen, besteht die Möglichkeit zur Annahme, dass die Entzugsleistung auch bei den übrigen Temperaturspreizungen in vergleichbarer Größenordnung unterhalb der Werte des unverschmutzten Zustandes liegen.

Die in Abbildung 5-11 aufgeführten Ergebnisse der Messreihe 2 zum Einfluss der Fließgeschwindigkeit stützen diese Annahme teilweise. Die Messwerte unter den Bedingungen  $\Delta\theta_{VL/WQ} \approx 4 \text{ K}/Q_{WQA,max}$  zeigen eine deutliche Diskrepanz zu den Ausgangswerten des unverschmutzten Zustands. Von besonderem Interesse ist jedoch die Tatsache, dass für  $\Delta\theta_{VL/WQ} \approx 3,5 \text{ K}/Q_{WQA,min}$ , also minimalen Durchfluss im Wärmeübertrager, keine nennenswerte Beeinträchtigung der Entzugsleistung durch den Biofilm auftritt. Diese Tatsache kann auch in Messreihe 2 am „Stegplattenmuster“ beobachtet werden, da die Abweichung dort vermutlich auf eine um 0,2 K erhöhte Temperaturspreizung zurückzuführen ist. Die Ergebnisse der beiden Messreihen 2 lassen somit den Rückschluss zu, dass der Einfluss des Biofilms auf die Wärmeentzugsleistung bei geringerem Durchfluss  $Q_{WQA}$  des Wärmeträgermediums abnimmt. Zudem konnte auch am „Spiralmuster“ keine optische Dezimierung des Biofilms aufgrund der Strömungsbelastung festgestellt werden. Die maximale Fließgeschwindigkeit am Wärmeübertrager betrug auch hier 0,8 m/s.

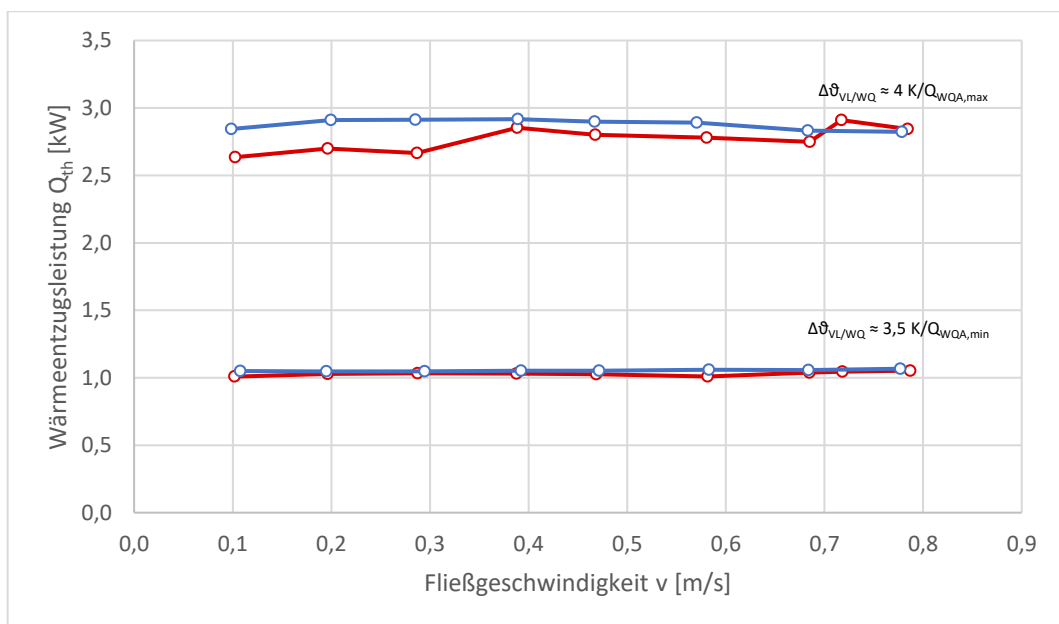


Abbildung 5-11: Ergebnisse Messreihe 2 „Spiralmuster“ (blau: unverschmutzter Zustand; rot: mit Biofilmbewuchs)

Auch für das „Spiralmuster“ wurden die Messungen der Fließgeschwindigkeit mithilfe des ADV entlang einer horizontalen Achse durchgeführt. Das entsprechende Messraster und die Geschwindigkeitswerte an den verschiedenen Messpunkten befinden sich in Anhang VII. Die graphische Darstellung der jeweiligen Messewerte zeigt Abbildung 5-12. Hier ist im Bereich des Wärmeübertragers eine deutliche Verringerung der Fließgeschwindigkeiten erkennbar. Die seitliche Zunahme der Geschwindigkeiten weist zudem darauf hin, dass die Umströmung des Wärmeübertragers stärker ausgeprägt ist als die Durchströmung. Verglichen mit den Geschwindigkeitsmessungen am „Stegplattenmuster“, liegen am „Spiralmuster“ damit deutlich ungünstigere Strömungsverhältnisse in Bezug auf die Wärmeentzugsleistung und die Vermeidung von Foulingprozessen vor.

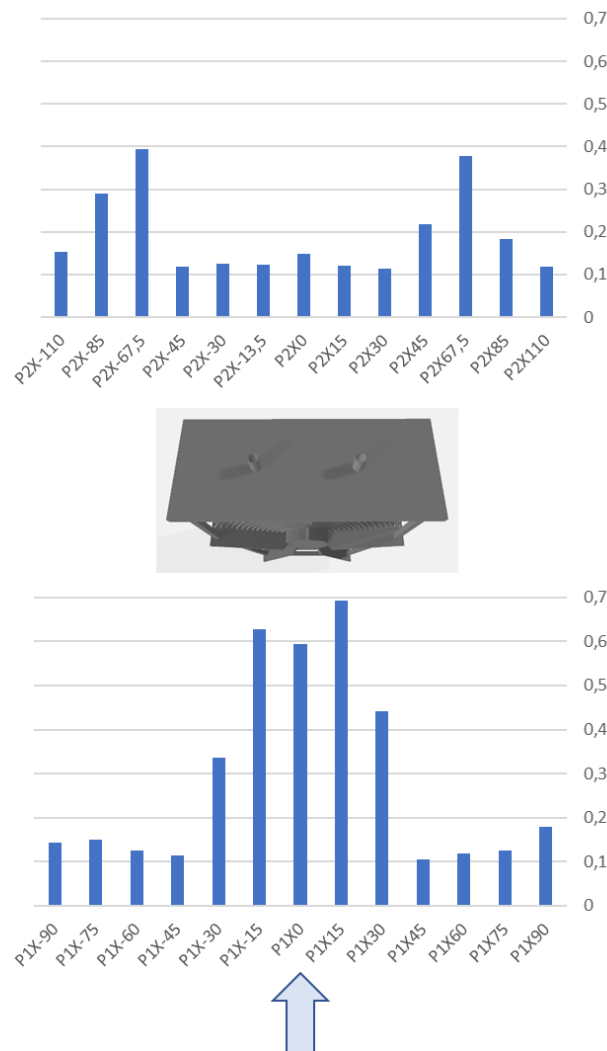


Abbildung 5-12: Horizontale Fließgeschwindigkeiten in [m/s] am "Spiralmuster"

## Fazit

Die Untersuchungen an den Wärmeübertragungssystemen „Stegplattenmuster“ und „Spiralmuster“ haben gezeigt, dass das Wachstum von Biofilmen auf den wärmeübertragenden Flächen eine Beeinträchtigung der Wärmeentzugsleistung bewirkt. Die Abweichungen vom unverschmutzten Zustand befinden sich mit einem Ausmaß von maximal 0,2 kW nach 6 bzw. 8 Wochen der Biofilmentwicklung jedoch in einem tolerierbaren Bereich. Diese Ergebnisse können jedoch nicht uneingeschränkt auf die praktische Anwendung von Wärmequellenanlagen in natürlichen Fließgewässern übertragen werden. In Abhängigkeit des verfügbaren Nährstoffangebots ist eine stärkere Biofilmentwicklung in diesem Zeitraum durchaus möglich. Allerdings ist die Wärmequellenanlage im Fließgewässer auch einer kontinuierlichen Strömungsbelastung ausgesetzt, wodurch das Wachstum des Biofilms wiederum gehemmt wird. Die in Kap. 3.3 beschriebene Toleranzschwelle bei der Entwicklung von Biofilmen ist somit für jede Wärmequellenanlage im Einzelfall festzulegen.

## Reinigungsvorgang

Die Wärmeübertragungssysteme „Stegplattenmuster“ und „Spiralmuster“ wurden nach einem Verbleib von insgesamt 12 Wochen im Aufwuchsbehälter einer Reinigung unterzogen, um den biologischen Bewuchs von den wärmeübertragenden Flächen zu entfernen. In feuchtem Zustand konnte der Biofilm unter geringer Aufwendung mechanischer Scherkräfte gelöst werden. Durch den Einsatz eines Niederdruckreinigers war eine rückstandslose Entfernung der Ablagerungen möglich (siehe Abbildung 5-13).



Abbildung 5-13: Rückstandslose Entfernung des Biofilms unter Einsatz eines Niederdruckreinigers am Wärmeübertragungssystem „Stegplattenmuster“

Gegenüber dem „Stegplattenmuster“ war die Reinigung des „Spiralmusters“ jedoch mit erheblich höherem Aufwand verbunden. Die Ablagerungen an den Schläuchen im inneren Bereich der Spiralanordnung waren nur schwer zu erreichen. Hier wurde deutlich, dass für eine einfache Durchführung von Reinigungsmaßnahmen an Wärmeübertragersystemen bereits bei der Konstruktion eine gute Zugänglichkeit der wärmeübertragenden Flächen grundsätzlich zu beachten ist.

## 5.5 Alternativer Berechnungsansatz

Wie bereits in Kap. 2.2 erläutert, wird die Berechnung von Wärmeübertragern meist anhand des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  der wärmeübertragenden Fläche durchgeführt. Die Konstruktion und Strömungsführung des Wärmeübertragers ist dabei von grundlegender Bedeutung. Als bekannteste Bauformen gelten Gleichstrom-, Gegenstrom- und Kreuzstromwärmeübertrager (vgl. Kap. 2.2). Der Wärmestrom  $\dot{Q}$  [kW] kann mit dem konstruktionsabhängigen Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  [kW/(m<sup>2</sup>·K)], der Wärmeübertragungsfläche  $A$  [m<sup>2</sup>] und der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$  [K] folgendermaßen ausgedrückt werden (Stieglitz 2012, S. 676):

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (5.6)$$

Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$  ist vom Temperaturverlauf der entsprechenden Bauform des Wärmeübertragers abhängig. Die qualitativen Temperaturverläufe für Gleichstrom- und Gegenstromwärmeübertrager sind in Abbildung 5-14 dargestellt. Bei einer Gleichstromführung tritt die größte Temperaturdifferenz am Eintritt des Wärmeübertragers auf. Entlang des Fluidstroms kommt es zu einer kontinuierlichen Abnahme der Temperaturdifferenz mit einem Minimalwert an der Austrittsöffnung. Die Temperaturwerte bei der Gegenstromführung hängen von der spezifischen Wärmekapazität und dem Massenstrom der beiden Fluide ab.

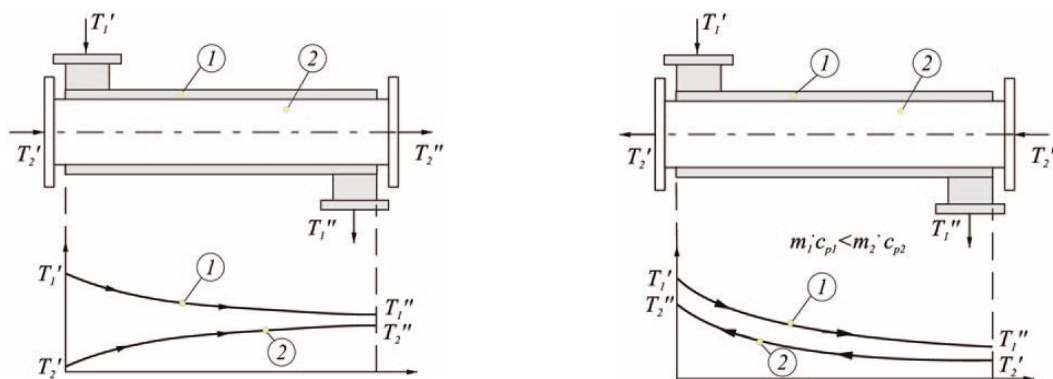


Abbildung 5-14: Qualitativer Temperaturverlauf der Bauformen Gleichstrom (links) und Gegenstrom (rechts) (Stieglitz 2012, S. 680)

Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$  ergibt sich aus dem Integral der lokalen Temperaturdifferenzen über die gesamte Wärmeübertragungsfläche und kann durch den folgenden Zusammenhang sowohl für Gleichstrom als auch Gegenstrom beschrieben werden (Stieglitz 2012, S. 677):



$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_a - \Delta T_e}{\ln\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_e}\right)} \quad (5.7)$$

Hierbei beschreibt  $\Delta T_e$  die Temperaturdifferenz an der Eintrittsseite und  $\Delta T_a$  entsprechend an der Austrittsseite des Wärmeübertragers.

Bislang wurde bei den Berechnungen in den Kap. 5.3 und 5.4 ausschließlich der aufgenommene Wärmestrom durch das Wärmeträgermedium mit der allgemeinen Grundgleichung (5.1) für den Wärmestrom berechnet. Der hier beschriebene Ansatz bezieht sich nun auf den Wärmestrom, welcher durch die Wärmeübertragungsfläche  $A$  hindurchtritt. Da die beiden Wärmeströme im stationären Zustand gleich sind, gilt das folgende Verhältnis (Stieglitz 2012, S. 678):

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = k \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (5.8)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  ist dabei die zentrale Größe. Er steht in Abhängigkeit der Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  an den Grenzflächen sowie der materialspezifischen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und wird über den Wärmedurchgangswiderstand  $R$  ausgedrückt (Stieglitz 2012, S. 678):

$$R = \frac{1}{k \cdot A} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot A_1} + \frac{1}{\lambda \cdot A} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot A_2} \quad (5.9)$$

Anhand der Ergebnisse für den Wärmestrom  $\dot{Q}$  aus den Kap. 5.3 und 5.4 kann mit Gl. (5.8) der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  berechnet werden. Dieser Wert ist für die Beurteilung der Beeinträchtigungen durch Ablagerungsbildung gut geeignet, da er den Wärmedurchgang durch die Übertragungsfläche unabhängig von der vorliegenden Temperaturspreizung am Wärmeübertrager angibt. Die Auflösung von Gl. (5.8) nach  $k$  ergibt:

$$k = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T_m} \quad (5.10)$$

Mit diesem Ansatz wurden die Messergebnisse für den verschmutzten Zustand am „Stegplattenmuster“ und am „Spiralmuster“ nochmals hinsichtlich eines verminderten Wärmedurchgangs überprüft. Aufgrund von abweichenden Temperaturspreizungen gegenüber den Messungen im unverschmutzten Zustand war bei den Berechnungen in Kap. 5.4 eine uneingeschränkte Vergleichbarkeit teilweise nicht gewährleistet. Dafür wurde zunächst die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz über die Messwerte der vier Pt 100 Temperaturfühler berechnet. Mit den Werten des Wärmestroms  $\dot{Q}$  nach Gl. (5.1) und der bekannten Wärmeübertragungsfläche  $A$  erfolgte anschließend eine Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$ . Die Ergebnisse

sind sowohl für das „Stegplattenmuster“ als auch das „Spiralmuster“ in Abbildung 5-15 dargestellt. Um die Unabhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten von der Temperaturspreizung am Wärmeübertrager zu verdeutlichen, wurden für die Berechnungen von  $k$  im unverschmutzten Zustand die Messergebnisse einer geringeren Temperaturspreizung gewählt. Dennoch liegt der Wärmedurchgangskoeffizient deutlich über den entsprechenden Werten für den Zustand mit biologischem Bewuchs.

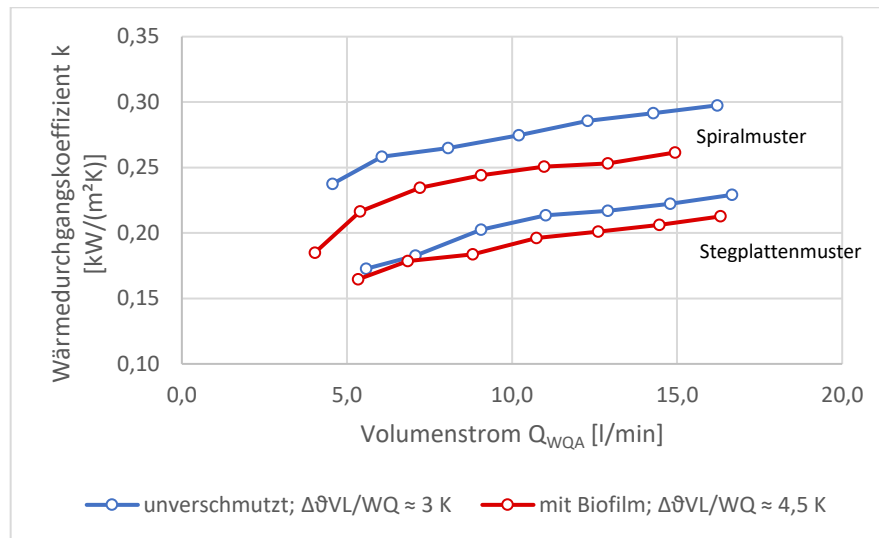


Abbildung 5-15: Abnahme der Wärmedurchgangskoeffizienten bei biologischem Bewuchs

Anhand der Abbildung 5-15 ist ein verminderter Wärmedurchgang aufgrund des biologischen Bewuchses an beiden Wärmeübertragersystemen deutlich zu erkennen. Außerdem zeigt sich für das „Spiralmuster“ eine stärkere Ausprägung des Unterschieds zum Wärmedurchgang im unverschmutzten Zustands. Dies ist womöglich auf die längere Verweildauer im Aufwuchsbehälter und somit ein größeres Ausmaß des Biofilms zurückzuführen.

Die Anwendung dieses Berechnungsansatzes ist üblicherweise durch eine Korrekturrechnung zu ergänzen. Da es in dieser Arbeit jedoch ausschließlich für einen qualitativen Nachweis angewendet wurde, wird an dieser Stelle auf die Korrekturrechnung verzichtet. Darüber hinaus ist die Anwendung dieses Verfahrens grundsätzlich eher für die Berechnung von kompakten Wärmeübertragern ausgelegt. Zum einen ist die Bauform der untersuchten Wärmeübertragersysteme nicht eindeutig einer Gleichstrom- oder Gegenstromführung zuzuordnen. Zum anderen wird am wärmeströmungstechnischen Prüfstand die Abkühlung der Wärmequelle zwar durch die unmittelbar vor bzw. hinter dem Wärmeübertrager installierten Temperaturfühler erfasst, jedoch sind diese Messwerte mit Ungenauigkeiten behaftet und führen damit möglicherweise verfälschten Ergebnissen für die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$ .

## 6. Gestaltungsempfehlungen für konstruktive Schutzmaßnahmen

Wärmequellenanlagen in Fließgewässern sind zahlreichen Einwirkungen aus der Umgebung ausgesetzt. Wie bereits in den Kap. 3 und 4 beschrieben, können dabei insbesondere die biologische und chemische Beschaffenheit des Gewässers sowie die enthaltenen Feststoffe erheblichen Einfluss auf den Betrieb des Wärmeübertragers nehmen. Dabei kann es sowohl zu einer Verringerung der Wärmeentzugsleistung als auch zu mechanischen Schäden an der Anlage kommen. Um jedoch Leistungsminderungen bzw. aufwendige Reinigungs- und Reparaturarbeiten bestmöglich zu vermeiden, ist das Anbringen von entsprechenden Schutzvorrichtungen an den Wärmequellenanlagen zu empfehlen. Diese sind so zu konzipieren, dass die gesamte Anlage vor Verlegungen und mechanischen Schäden durch Schwemmgut und Schwimmstoffe geschützt wird, dabei jedoch keine Beeinträchtigung der Wärmeentzugsleistung stattfindet.

In diesem Kapitel werden einige Vorschläge für konstruktive Schutzmaßnahmen vorgestellt. In Kap. 6.1 erfolgt zunächst eine Betrachtung von verschiedenen Formen und Ausführungen eines Einlaufschutzes, welcher direkt am Wärmeübertrager angebracht wird. Dieser kommt überwiegend bei der Installation einzelner Wärmeübertrager zum Einsatz. Bei größeren Anlagen mit einer Kombination aus mehreren Wärmeübertragern empfiehlt sich dagegen die Abschirmung der gesamten Anlage durch Leitrechen. Mögliche Ausführungsformen dafür sind in Kap. 6.2 erläutert.

Der Einbau von Schutzkonstruktionen in den Fließquerschnitt ist mit einer Veränderung der lokalen Strömungsverhältnisse verbunden. Die Auswirkungen auf die Strömung fallen in Abhängigkeit der Abmessungen und der Anordnung der jeweiligen Schutzkonstruktion unterschiedlich aus. Die grundlegenden hydraulischen Gleichungen werden im Folgenden kurz erläutert.

### Kontinuitätsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung beschreibt die Berechnung der Durchflussmenge  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] in einem senkrecht durchströmten Gerinnequerschnitt anhand der mittleren Fließgeschwindigkeit  $v$  [m/s] und der durchströmten Querschnittsfläche  $A$  [m<sup>2</sup>]. Nach dem Prinzip der Massenerhaltung ergibt sich für inkompressible Fluide die folgende Gleichung (Giesecke et al. 2014, S. 31):

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = \dots = v_i \cdot A_i = \text{const} \quad (6.1)$$

Eine Veränderung der Querschnittsfläche des Gerinnes bewirkt demnach auch eine Veränderung der lokalen Fließgeschwindigkeit. Durch das Einbringen eines Strömungshindernisses, bspw. in Form eines Rechens, wird eine Verengung des Fließquerschnitts hervorgerufen, wodurch es an dieser Stelle zu einer lokalen Erhöhung der Fließgeschwindigkeit kommt.

### Bernoulli'sche Gleichung

Die hydraulische Energiehöhe  $h_e$  einer stationären Strömung wird durch die Energiegleichung nach Bernoulli ausgedrückt. Sie setzt sich aus den drei Komponenten Geschwindigkeitshöhe  $h_k$ , Druckhöhe  $h_p$  und geodätische Höhe  $z$  zusammen. Bei realen Fluiden sind zudem die Einflüsse von Reibung, Oberflächenspannung und Turbulenzen zu berücksichtigen, wodurch die Gleichung um die Verlusthöhe  $h_v$  ergänzt wird. Die Energiegleichung nach Bernoulli lautet somit (Giesecke et al. 2014, S. 29 f.):

$$h_e = h_k + h_p + z + h_v = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho_w g} + z + h_v \quad [\text{m}] \quad (6.2)$$

$v$	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$g$	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$\rho_w$	Dichte des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$p$	Wasserdruck	[N/m <sup>2</sup> ]
$z$	geodätische Höhe	[m]

Für die Gestaltung und Bemessung von Schutzkonstruktionen ist insbesondere die Verlusthöhe  $h_v$  von wesentlicher Bedeutung. Eine nähere Erläuterung von  $h_v$  wird daher im nachfolgenden Kap. 6.1 gegeben.

## 6.1 Einlaufschutz

Bei der Errichtung von einzelnen Wärmequellenanlagen in Fließgewässern eignet sich die Anbringung einer Schutzvorrichtung direkt am Einlauf des Wärmeübertragers. Damit wird die Beeinflussung des natürlichen Fließverhaltens und der Durchgängigkeit des Gewässers auf ein möglichst niedriges Maß reduziert.

Bei der Konstruktion des Einlaufschutzes sind zwei wesentliche Kriterien zu berücksichtigen. Zum einen ist der Einlaufschutz so zu gestalten, dass er nicht als zusätzliches Strömungshindernis wirkt und somit zu einer Verringerung der Fließgeschwindigkeiten am Wärmeübertrager sowie zu einer erhöhten Anfälligkeit für eine Verlegung mit Schwemmgut führt. Die Konstruktion ist daher in einer strömungstechnisch günstigen Form zu gestalten. Zum anderen besteht

dabei jedoch die Gefahr, dass aufgrund des stromlinienförmigen Aufbaus eine Tangentialströmung entlang des Wärmeübertragers entsteht und damit keine ausreichende Durchströmung der wärmeübertragenden Platten stattfindet. In beiden Fällen wäre eine verringerte Wärmezugsleistung sowie ein erhöhtes Foulingverhalten aufgrund von vergünstigten Bedingungen für Biofilmbildung und Sedimentation die Folge. Die Herausforderung bei der Gestaltung des Einlaufschutzes besteht also darin, einen Ausgleich zwischen diesen beiden Effekten zu schaffen und somit eine Beeinträchtigung des Wärmeentzugs bestmöglich zu vermeiden.

Um eine ausreichende Stabilität hinsichtlich mechanischer Belastungen zu gewährleisten, wird die Ausführung des Einlaufschutzes an der Wärmequellenanlage als Gitterkonstruktion aus festen Stäben empfohlen. Bei der Anordnung und Ausgestaltung der Stäbe können zur Orientierung die Bemessungsgrundlagen für Rechenanlagen an Kraftwerkseinläufen herangezogen werden. Die Rechen dienen dort der Fernhaltung von Treibgut und Eis aus dem Triebwasserkanal des Kraftwerks, um eine Schädigung der Turbine zu verhindern (Giesecke et al. 2014, S. 159). Rechenanlagen in Fließgewässern bilden jedoch ein Strömungshindernis und sind daher stets mit lokalen Energieverlusten verbunden. Die Höhe dieser Verluste hängt dabei sowohl von geometrischen als auch strömungsbedingten Faktoren ab und wird durch die folgende Formel beschrieben (Meusburger 2002, S. 170-172):

$$h_{v,Re} = \beta \cdot \left( \frac{P}{1-P} \right)^{1,5} \cdot \left( 1 - \frac{\delta}{90^\circ} \right) \cdot P^{(-1,4 \cdot \tan \delta)} \cdot k_{v,i} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{v_a^2}{2g} \quad (6.3)$$

$h_{v,Re}$	Rechenverlust	[m]
$\beta$	Formbeiwert des Rechenstabes	[-]
$\delta$	Anströmwinkel	[°]
$P$	Verbauungsgrad des Rechens	[-]
$k_{v,i}$	Verlustfaktor für Rechenverlegung	[-]
$\alpha$	Neigungswinkel der Rechenstäbe	[°]
$v_a$	Anströmgeschwindigkeit	[m/s]
$g$	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]

Mit Blick auf den Einlaufschutz einer Wärmequellenanlage spielen insbesondere die geometrischen Abmessungen des Rechens sowie der Neigungs- und Anströmwinkel der Rechenstäbe eine entscheidende Rolle. Diese Kriterien sind bei der Auslegung der Schutzvorrichtung besonders zu berücksichtigen und werden daher im Folgenden näher betrachtet.

Die Verluste der unterschiedlichen Rechenstabformen werden durch den Formbeiwert  $\beta$  beschrieben. Um die auftretenden Verluste am Einlaufschutz möglichst gering zu halten, ist für die Konstruktion vorzugsweise eine Stabform mit niedrigem Beiwert zu wählen. Die unterschiedlichen Gestaltungsformen mit den jeweiligen Formbeiwerten sind in Abbildung 6-1 dargestellt.

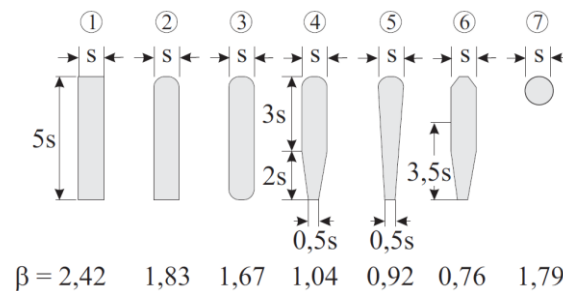


Abbildung 6-1: Formbeiwerte für verschiedene Rechenstäbe nach Kirschmer (Giesecke et al. 2014, S. 185)

Die lichte Weite zwischen den Rechenstäben ist so zu dimensionieren, dass sie durchgehend niedriger ist als der Plattenabstand am Wärmeübertrager. Zwar kommt es mit einer Verringerung der lichten Öffnungen zu einer Zunahme der hydraulischen Verluste, allerdings kann so eine unmittelbare Verlegung an den wärmeübertragenden Flächen verhindert werden. Es wird folglich nur den Feststoffpartikeln das Passieren des Einlaufschutzes ermöglicht, die klein genug sind, um sich auch zwischen den Platten des Wärmeübertragers nicht festzusetzen. Bei geringerem Stababstand kommt es außerdem zu einer verstärkten Wirbelbildung an den Rechenstäben (siehe Abbildung 6-2). Die auftretenden Turbulenzen im Bereich der Wärmequellenanlage fallen somit stärker aus und begünstigen damit, wie in Kap. 4.4 beschrieben, den Wärmeübertrag.

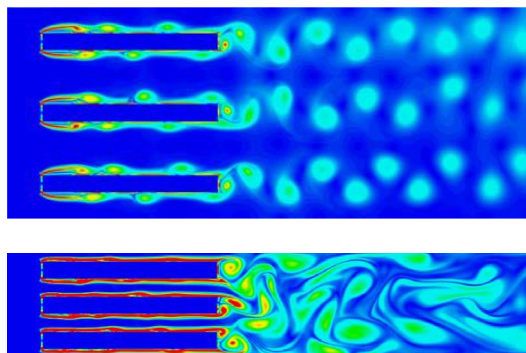


Abbildung 6-2: Zunahme der Wirbelbildung in Abhängigkeit der lichten Rechenstabweite (Meusburger 2002, S. 25)

Damit sich das zurückgehaltene Feststoffmaterial nicht dauerhaft ablagert und somit zu einer Verlegung am Einlaufschutz führt, ist eine schräge Anordnung der Rechenebene zweckmäßig. Dadurch werden auftreffendes Treibgut und Schwimmstoffe nicht von der Strömung an die Schutzkonstruktion angepresst, sondern im optimalen Fall direkt abgeleitet und mit der Strömung am Wärmeübertrager vorbei transportiert. Bei der Berechnung der hydraulischen Verluste an Rechenanlagen wird die Neigung der Rechenstäbe nach horizontaler und vertikaler Richtung unterschieden. Der Anströmwinkel  $\delta$  beschreibt die horizontale Neigung des Rechens bezüglich der Gerinnewandung bzw. dem Vektor der Anströmgeschwindigkeit  $v_A$ . Bei konventionellen Rechenanlagen beträgt der Anströmwinkel  $\delta$  meist  $90^\circ$ , aus Gründen des Fischschutzes und der Treibgutablenkung werden inzwischen jedoch auch vermehrt Anlagen mit horizontaler Neigung errichtet (siehe Abbildung 6-3). Bei einem Anströmwinkel von  $\delta < 90^\circ$  kann eine Vektoraufteilung der Anströmgeschwindigkeit in die Komponenten Normal- und Tangentialgeschwindigkeit vorgenommen werden. Der Vektor der Normalgeschwindigkeit  $v_N$  trifft dabei orthogonal auf die Rechenebene, die Tangentialgeschwindigkeit  $v_T$  wirkt parallel zum Rechen. Mit abnehmender Größe des Anströmwinkels  $\delta$  nimmt die Tangentialgeschwindigkeit zu und verursacht eine Leitströmung entlang des Rechens (Berger und Weibel 2015, S. 4). Damit wird der Weitertransport des auftreffenden Feststoffmaterials begünstigt, die hydraulischen Verluste steigen jedoch bei kleineren Anströmwinkeln an, da es vermehrt zu Ablösungs- und Turbulenzerscheinungen kommt. Die horizontale Neigung bei der Konstruktion des Einlaufschutzes ist daher so zu gestalten, dass dennoch eine ausreichende Durchströmung des Wärmeübertragers gewährleistet wird.

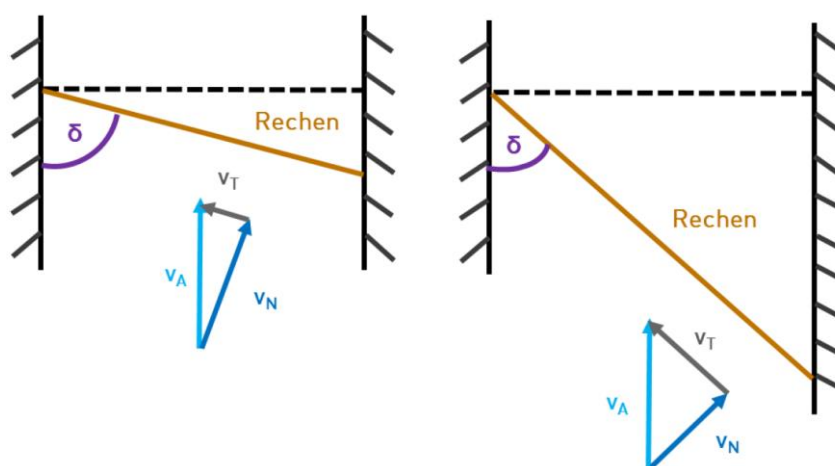


Abbildung 6-3: Geschwindigkeitsvektoren in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\delta$  (Berger und Weibel 2015, S. 4)



Die vertikale Neigung wird über den Neigungswinkel  $\alpha$  berücksichtigt und beschreibt die Schrägstellung der Rechenebene zur Sohle (siehe Abbildung 6-4). Auch hier kann die Anströmgeschwindigkeit in die Strömungsvektoren der Normalgeschwindigkeit senkrecht zum Rechen und der Tangentialgeschwindigkeit parallel zum Rechen zerlegt werden. Die vertikale Rechenneigung wird in der Praxis meist in Verbindung mit einem Bypass-System ebenfalls zur Fernhaltung von Fischen und Schwemmgut aus dem Turbinenbereich von Kraftwerken eingesetzt (Berger 2017, S. 17). Nach Gl. (6.3) treten bei starker vertikaler Neigung, also für kleine Werte von  $\alpha$ , geringere Energieverluste am Rechen auf.

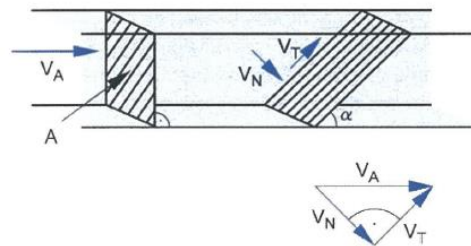


Abbildung 6-4: Geschwindigkeitsvektoren bei senkrechter und vertikal geneigter Rechenebene (Adam 2005, S. 90)

Neben der Ausrichtung der gesamten Rechenebene kann auch bei der Anordnung der einzelnen Rechenstäbe nach horizontaler und vertikaler Richtung unterschieden werden. Bei konventionellen Rechen erfolgt die Anordnung der Stäbe zumeist in vertikaler Richtung, da es sich dabei um eine einfach Bauweise mit verschiedensten Möglichkeiten der Rechenreinigung handelt. Mit der zunehmenden Relevanz des Fischschutzes steigt jedoch auch der Einsatz von Horizontalrechen als mechanische Barriere an Kraftwerkseinläufen, da diese neben der Schutzwirkung auch über eine Leitwirkung für die Fische verfügen. (Berger 2017, S. 3) Zudem treten an Horizontalrechen bei kleinen Anströmwinkeln  $\delta$  geringere hydraulische Verluste auf als bei entsprechend angeordneten Vertikalrechen. Eine ausführliche Erläuterung der Eigenschaften von Horizontalrechen erfolgt in Kap. 6.2.

Unter Berücksichtigung der erläuterten Kriterien zu den hydraulischen Verlusten an Rechenanlagen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Gestaltungsempfehlung für einen Einlaufschutz an Wärmeübertragern in Fließgewässern entwickelt. Wie eingangs bereits erwähnt, lag der Schwerpunkt bei der Entwicklung darauf, die hydraulischen Verluste am Einlaufschutz so gering wie möglich zu halten und dennoch eine optimale Abschirmung bzw. Weiterleitung von Feststoffen zu erzeugen. Der Vorschlag einer Schutzkonstruktion für Wärmeübertragersysteme mit rechteckiger Querschnittsform ist in Abbildung 6-5 dargestellt.

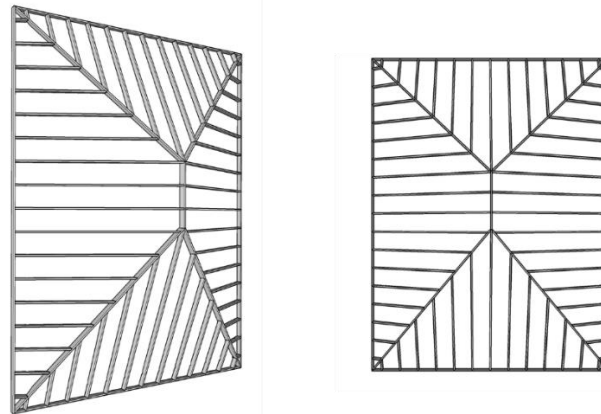


Abbildung 6-5: Mögliche Gestaltung eines Einlaufschutzes für rechteckige Wärmeübertrager (links: Schrägansicht, rechts: Frontalansicht)

Der gesamte Aufbau des Einlaufschutzes ist auf eine gleichmäßige und möglichst störungsfreie Durchströmung des Wärmeübertragers ausgelegt. Die Konstruktion verfügt daher über keine orthogonal angeströmten Ebenen, da diese mit einem erhöhten Strömungswiderstand verbunden sind. Die durchweg geneigte Form der Rechenebenen verhindert zugleich das strömungsbedingte Anpressen von Feststoffmaterial und damit eine Verlegung des Einlaufschutzes. Die Verbindungsstege zwischen den einzelnen Ebenen, insbesondere der Mittelsteg, bewirken eine Aussteifung des Systems und sorgen somit für eine hohe Stabilität der Konstruktion. Die unterschiedliche Anordnung der Rechenstäbe in den einzelnen Rechenebenen ist ebenfalls durch die Reduzierung der hydraulischen Verluste begründet. So werden die Energieverluste bei den vertikal geneigten Rechen im oberen und unteren Bereich der Schutzkonstruktion durch eine vertikale Ausrichtung der Rechenstäbe minimiert. Für horizontal geneigte Rechen, wie hier an den Seiten der Schutzkonstruktion, sinkt die Verlusthöhe hingegen bei horizontal angeordneten Rechenstäben. Die Form der Rechenstäbe ist nach Abbildung 6-1 für einen entsprechend niedrigen Beiwert zu wählen. Die lichte Weite zwischen den Stäben ist zudem in Abhängigkeit der Abstände zwischen den wärmeübertragenden Flächen des jeweiligen Wärmeübertragers anzupassen. Für eine hohe Langlebigkeit des Einlaufschutzes sollte zudem ein stabiles und zugleich korrosionsbeständiges Material für die Konstruktion verwendet werden. Zur Orientierung können auch hier konventionelle Rechenanlagen an Kraftwerkseinläufen herangezogen werden. Diese sind zumeist aus verzinktem Stahl oder auch Edelstahl gefertigt (Giesecke et al. 2014, S. 183). Die zulaufenden Kanten und Eckpunkte sind zudem so zu gestalten, dass keine Verletzungsgefahr für Fische und andere aquatische Organismen besteht. Kommt es trotz der Leitwirkung der Konstruktion dennoch zu Verlegungen am Einlaufschutz, ist eine manuelle Reinigung des Systems durchzuführen. Da diese Arbeiten mit einer Betriebsunterbrechung verbunden

sind, sollte der Vorgang im besten Fall mit den regelmäßigen Reinigungsarbeiten an der Wärmequellenanlage verbunden werden.

Für Wärmeübertragersysteme mit unterschiedlichen Abmessungen des Rechteckquerschnitts kann diese Konstruktion durch eine Variation in der Länge des Mittelstegs entsprechend angepasst werden. Bei quadratischen Querschnitten ist eine Pyramidenform denkbar, die Anordnung der horizontalen und vertikalen Rechenstäbe sollte jedoch beibehalten werden.

Eine weitere Variation der Schutzkonstruktion für Wärmeübertragersysteme mit kreisförmiger Querschnittsfläche ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Die grundlegenden Prinzipien des Aufbaus sind den Erläuterungen der rechteckigen Variante nachempfunden.

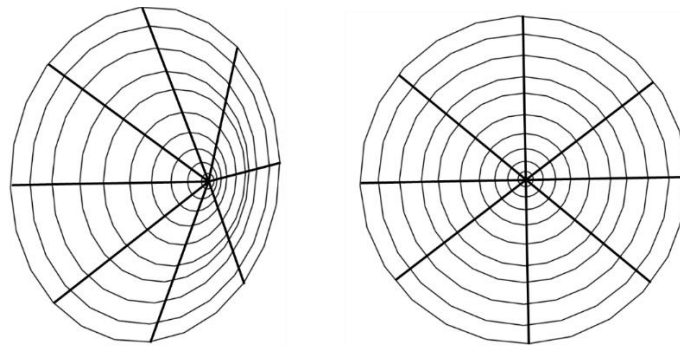


Abbildung 6-6: Mögliche Gestaltung eines Einlaufschutzes für kreisförmige Wärmeübertrager (links: Schrägansicht, rechts: Frontalansicht)

Die Schutzkonstruktion für kreisförmige Wärmeübertrager ist in Anlehnung an die Form eines Kegels dargestellt. Diese Ausführung ist auf eine optimale Ableitung des auftreffenden Schwemmguts ausgelegt. Falls durch diese annähernde Stromlinienform jedoch eine ausreichende Durchströmung des Wärmeübertragers nicht gewährleistet werden kann, ist eine Abflachung der zulaufende Spitze hin zu einer Halbkugelform denkbar. In dieser Form bestünde auch eine geringere Verletzungsgefahr für die im Gewässer befindlichen Lebewesen. Sowohl die Form als auch der Abstand der kreisförmigen Gitterstäbe sind auch hier anhand der oben genannten Kriterien zu bemessen. Die Aussteifung der Konstruktion erfolgt durch die senkrecht zum kreisförmigen Gitter angeordneten Stäbe. Die Fertigung der Konstruktion kann ebenfalls unter Verwendung von verzinktem Stahl oder Edelstahl erfolgen. Für eine Steigerung der Flexibilität und gegebenenfalls einen vereinfachten Reinigungsprozess kann anstelle der kreisförmigen Gitterstäbe auch die Einspannung von Stahldraht in Betracht gezogen werden. Der Abstand der Drähte könnte mit geringem Aufwand variiert und der Einlaufschutz entsprechend einfach an verschiedene Wärmeübertragersysteme angepasst werden. Die Ausführungsform ist

jedoch im Hinblick auf eine ausreichende Stabilität gegenüber auftretenden Feststoffmaterialien zu überprüfen. Generell ist zu beachten, dass die hier vorgestellten Konstruktionen für den Schutz von Wärmeübertragern in Fließgewässern ausschließlich auf der Basis von theoretischen Überlegungen entwickelt wurden. Diese Gestaltungsempfehlungen sind daher durch experimentelle Untersuchungen hinsichtlich ihrer Funktionalität zu ergänzen.

## 6.2 Leitrechen

Zur Deckung von erhöhten Wärmebedarfsmengen werden häufig mehrere Wärmeübertrager zu einer größeren Anlage kombiniert. In diesen Fällen empfiehlt sich ein gemeinsamer Schutz aller installierten Wärmeübertrager durch das Einbringen eines Leitrechens im Oberlauf der Anlage. Dieser wird darauf ausgelegt, eine Leitströmung zu erzeugen und damit das anfallende Feststoffmaterial an den Wärmeübertragern vorbeizuführen, ohne dabei in direkter Verbindung mit der Anlage zu stehen. Damit werden übermäßige Verlegungen unmittelbar an den Wärmeübertragern verhindert und die damit verbundenen Leistungsverluste bzw. Reinigungsmaßnahmen eingedämmt. Leitrechen werden meist im Einlaufbereich von Wasserkraftanlagen eingesetzt, um dort abwandernde Fische vor dem Einschwimmen in die Turbine zu schützen und durch ein Bypass-System in das Unterwasser abzuleiten. Auch für die Ableitung von Schwemmgut kommt dieses System inzwischen zum Einsatz, um zum einen die aufwändige Entsorgung des Rechenguts zu umgehen und zum anderen das Schwemmgut als wichtige Nährstoffquelle im Gewässer zu belassen (siehe Kap. 4.3). Das anfallende Treibgut und Geschwemmsel wird ebenfalls durch die Leitwirkung eines horizontal geneigten Rechens aus dem Einlaufbereich des Kraftwerks abgeleitet und über einen Bypass dem Unterwasser zugeführt. Wie bereits im vorherigen Kap. 6.1 kurz beschrieben, entsteht entlang eines horizontal geneigten Strömungshindernisses aufgrund des Staudrucks ein tangentialer Fließgeschwindigkeitsvektor. Die tangentielle Leitwirkung am Rechen bewirkt eine Abführung des auftretenden Feststoffmaterials und verhindert somit eine Verlegung des Rechens. In der Praxis hat sich eine kontinuierliche Weiterleitung des Schwemmguts infolge der Ausbildung einer tangentialen Leitströmung an horizontal geneigten Rechen mit einem Winkel von  $45^\circ$  bzw.  $38^\circ$  zur Uferlinie bestätigt (Gluch 2007, S. 40).

Abbildung 6-7 zeigt eine mögliche Anordnung des Leitrechens im Fließgewässer. Der Rechen ist mit der Gerinnewandung verbunden und um den Anströmwinkel  $\delta$  horizontal geneigt. Die Schutzvorrichtung erstreckt sich über den gesamten Bereich der Wärmequellenanlage, um einen rückwirkenden Eintrag der Feststoffe aufgrund von Sekundärströmungen, Ablösungerscheinungen und Wirbelbildung zu vermeiden. Für einen optimalen Wärmeentzug ist auch

beim Einsatz von Leitrechen eine ausreichende Umströmung der wärmeübertragenden Flächen sicherzustellen. Dafür ist neben der tangentialen Leitströmung dennoch ein ausreichender Durchfluss durch den Rechen erforderlich. Die Ausführung des Leitrechens wird daher entweder als Horizontalstabrechen oder Lochblechrechen empfohlen. Diese beiden Rechensysteme werden nachfolgend kurz vorgestellt.

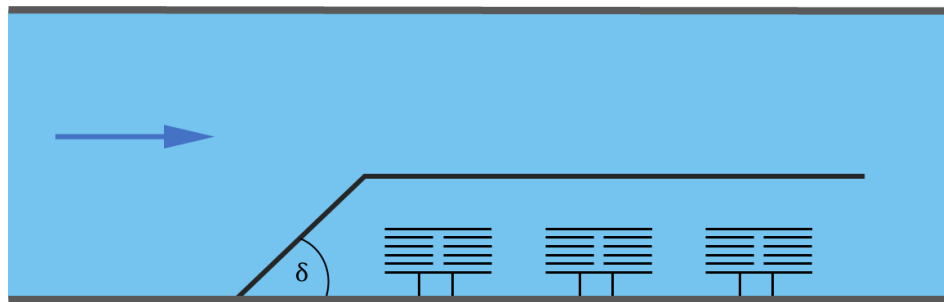


Abbildung 6-7: Anordnung des Leitrechens im Fließgewässer zum Schutz der Wärmequellenanlage

An Wasserkraftanlagen werden für einen verbesserten Fischschutz vermehrt schräg angeströmte Horizontalstabrechen eingesetzt, da diese neben der Schutzfunktion auch über eine Leitwirkung für die Fische verfügen. Der Horizontalstabrechen zeichnet sich durch eine horizontale Anordnung der Rechenstäbe aus und wird orthogonal zur Sohle des Gewässers angebracht (siehe Abbildung 6-8). In Verbindung mit einer Neigung um den horizontalen Winkel  $\delta$  zur Hauptströmung wird diese Bauform auch als Schrägrechen bezeichnet. Horizontalstabrechen wirken ebenso wie konventionelle Vertikalrechen als Strömungshindernis und sind mit hydraulischen Verlusten verbunden. Eine Anwendung klassischer Formeln zur Ermittlung der Rechenverluste, wie bspw. Gl. (6.3), wird von Berger (2017) auf der Grundlage von experimentellen Untersuchungen jedoch nicht empfohlen. Berechnungsformeln, welche für konventionelle Rechen bzw. Louver und Bar Racks entwickelt wurden, sind aufgrund von Unterschieden in der Geometrie und Auslegung auf schräg angeströmte Horizontalstabrechen nicht übertragbar. In diesem Zusammenhang wurden Grafiken für bestimmte Rechenparameter und hydraulische Randbedingungen aufgestellt, welche für die entsprechenden Voraussetzungen am Rechen eine grafische Rechenverlustermittlung zulassen (Berger 2017, S. 56). Bei abweichenden Parametern sind die auftretenden Rechenverluste experimentell im Labor zu ermitteln. Grundsätzlich spielt jedoch auch bei Horizontalstabrechen der Verbauungsgrad eine entscheidende Rolle, da bei geringerer Verbauung durch schlankere Rechenstäbe und Stützpfeiler auch die hydraulischen Verluste abnehmen. Es ist jedoch stets eine ausreichende Stabilität gegenüber auftretenden Druckbelastungen durch Treibgut, Eis und Hochwasser zu gewährleisten. Zudem hat sich in experimentellen Untersuchungen gezeigt, dass die Rechenverluste an Schrägrechen

bei geringeren Stababständen, einem größeren Anströmwinkel sowie erhöhten Anströmgeschwindigkeiten zunehmen. (Berger 2017, S. 55 f.) Trotz der ausgeprägten Leitwirkung können auch an Schrägrechen Ablagerungen von Feststoffmaterial auftreten. Die Reinigung eines Horizontalstabrechens kann mithilfe einer Reinigungsanlage in Längsrichtung durchgeführt werden, wodurch eine Ableitung des anfallenden Rechenguts ohne eine Entnahme an das Unterwasser möglich ist.



Abbildung 6-8: Horizontalstabrechen mit Anströmwinkel  $\delta = 70^\circ$  (Berger 2017, S. 95)

Der Lochblechrechen wird überwiegend an Kleinwasserkraftanlagen eingesetzt und ist auf einen Verbleib des anfallenden organischen Schwemmguts im Gewässer ausgelegt. Er zeichnet sich zudem durch geringe Durchgangsmöglichkeiten für Fische aus und bietet daher eine Alternative zu konventionellen Stabrechen im Einlaufbereich von Turbinen. Lochblechrechen sind meist aus gewöhnlichen Lochblechen mit einer Lochung von 20-25 mm gefertigt und damit in der Anschaffung sehr kostengünstig. Die Lochanteile betragen dabei 50-56 %. Für eine ausreichende Festigkeit und Stabilität gegenüber den mechanischen Krafteinwirkungen am Lochblechrechen ist die Blechstärke auf 4-5 mm festgelegt. Untersuchungen haben gezeigt, dass für diese Abmessungen bei einer Fließgeschwindigkeit von 0,6 m/s in den Löchern der Druckverlust unter 2 mBar liegt. (Engel und Weber 2003, S. 43) Nach der Durchströmung des Lochblechs tritt das Wasser zunächst in Form von einzelnen Freistrahlen aus den Löchern aus. In Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit ist das Strömungsverhalten der Strahlen beim Austritt laminar oder turbulent. Mit zunehmendem Abstand zu den Austrittsöffnungen nimmt die Turbulenz des Einzelstrahls durch Reibungseffekte mit dem umgebenden Medium zu und es kommt zu einer Vermischung mit den benachbarten Strahlen. In dieser Mischzone findet ein Ausgleich der Geschwindigkeitsunterschiede statt, wodurch sich ein Sekundärstrahl mit konstanter Geschwindigkeitsverteilung entlang der Strahlachse ausbildet. Der Sekundärstrahl kann in seinem Strö-



mungsverhalten ebenfalls als Freistrahл angesehen werden, welcher jedoch durch das Zusammenfließen von Einzelstrahlen entstanden ist. Die Kernzone des Sekundärstrahls mit gleichmäßiger Geschwindigkeitsverteilung ist dabei umso größer, je mehr Einzelstrahlen sich zusammenschließen. Aufgrund der Reibungseffekte wird jedoch auch der Sekundärstrahl mit wachsender Entfernung zu den Austrittsöffnungen des Lochblechs abgebaut. (Huesmann 1966, S. 294-296) Die Anströmungsbedingungen am Wärmeübertrager sind somit von der entsprechenden Entfernung zum Lochblechrechen abhängig.

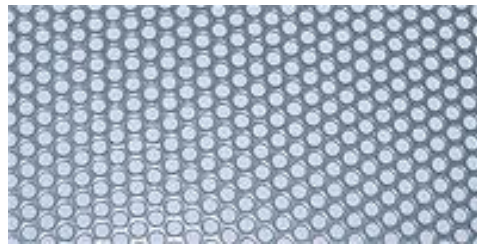


Abbildung 6-9: Ausschnitt eines Lochblechrechens (HUBER SE 2019, o. S.)

Lochblechrechen sind im Allgemeinen weniger widerstandsfähig als Stabrechen und benötigen eine Stützkonstruktion zur Aufnahme des Wasserdrucks. Zudem treten an frontal angeströmten Lochblechrechen oftmals mechanische Schäden in Form von Verbeulungen auf und verhindern so eine einwandfreie Reinigung. Bei einer horizontalen Neigung des Rechens findet dagegen praktisch keine Ablagerung von Treibgut und Schwimmstoffen an den Rechenelementen statt. Sogar größere Stämme und Wurzelstöcke werden mit der Tangentialströmung abgeleitet und verursachen so weder eine Beschädigung noch eine übermäßige Verlegung des Rechens. Das zurückgehaltene Geschwemmsel setzt sich jedoch zum Teil am Rechen ab und ist durch Reinigungsmaßnahmen zu entfernen. Die Reinigung von Lochblechrechen erfolgt meist durch den Einsatz einer Reinigungsmaschine, welche das Rechengut mithilfe eines Stahlmessers abträgt. Bewegt sich dieses in Längsrichtung des Rechens, ist eine Entnahme und damit auch eine Entsorgung des Rechenguts nicht erforderlich, da es analog zum Horizontalstabrechen ins Unterwasser abgespült werden kann. An einigen bestehenden Anlagen wird jedoch eine händische Entnahme der anorganischen Bestandteile vorgenommen. Der Einsatz von Lochblechrechen mit einem Abschieben des Rechenguts in Längsrichtung hat sich in der praktischen Anwendung an Kleinwasserkraftanlagen bereits mehrfach bewährt. Zudem besteht an Lochblechrechen kaum eine Verletzungsgefahr für Fische. (Engel und Weber 2003 S. 43 f.)



Anders als bei der Wasserfassung von Kraftwerkseinläufen ist für den Schutz von Wärmequellenanlagen ein vollständiger Rückhalt aller Feststoffarten über die gesamte Fließtiefe nicht erforderlich. Der Wärmeübertrager wird für eine optimale Durchströmung im mittleren Abflussteil des Gewässers installiert und steht weder mit der Gewässersohle noch der Wasseroberfläche in einer direkten Verbindung. Das an der Gewässersohle fortbewegte Geschiebe stellt demnach keine Gefahr der Beeinträchtigung für den Betrieb einer Wärmequellenanlage dar. Um eine verbesserte Durchgängigkeit für Geschiebe zu ermöglichen und damit Verlandungserscheinungen unmittelbar vor dem Rechen zu reduzieren, ist eine Vergrößerung der Stababstände bzw. der Lochung im sohlnahen Bereich denkbar. Auch das Geschwemmsel an der Gewässeroberfläche stellt in der Regel kein Risiko einer Verlegung dar, da es mit der Strömung über den Wärmeübertrager hinweg transportiert wird. Folglich kann eine Erweiterung der Stababstände auch im Bereich der Gewässeroberfläche in Betracht gezogen werden. Damit würde eine geringere Verlegung des Rechens erreicht und weniger Reinigungsmaßnahmen erforderlich. Es bleibt jedoch zu überprüfen, ob solche Inhomogenitäten in der Rechenfläche einerseits den Effekt der theoretischen Überlegungen erfüllen und dabei andererseits keine Beeinträchtigung der Wirtschaftlichkeit aufgrund von erhöhten Fertigungskosten eintritt.

Insgesamt verfügen Leitrechen verglichen mit einem individueller Einlaufschutz über einen verbesserten Schutz der Wärmequellenanlage gegenüber mechanischen Schäden und Verlegungen. Das Einbringen einer solchen Schutzkonstruktion in das Gewässer ist allerdings mit einem weitaus größeren Aufwand sowie einem stärkeren Eingriff in das natürliche Fließverhalten des Gewässers verbunden. Die Auswahl der entsprechenden Schutzvorrichtung sowie deren konkrete Gestaltung sind daher neben den Abmessungen der Wärmequellenanlage auch von den standortspezifischen Randbedingungen des Gewässers abhängig. Jede Anlage ist bei der Wahl einer geeigneten Schutzkonstruktion daher im Einzelfall auf die vorliegenden Einflussfaktoren zu überprüfen.

## 7. Fazit und Ausblick

Der Betrieb von Wärmequellenanlagen in Fließgewässern unterliegt einer Vielzahl unterschiedlicher Einwirkungen. Eine wesentliche Bedeutung kommt dabei der Wasserqualität sowie dem mitgeführten Feststoffmaterial zu. Die chemische Zusammensetzung natürlicher Fließgewässer resultiert aus vielfältigen Wechselwirkungen mit der Umgebung und stofflichen Einträgen aus dem Einzugsgebiet. Die Stoffzufuhr kann dabei nach natürlichen und anthropogenen Quellen unterschieden werden. Die Beurteilung der Gewässergüte erfolgt anhand chemisch-physikalischer und biologischer Parameter. In Bezug auf den Betrieb von Wärmequellenanlagen sind dabei der Gehalt an Nährstoffen, Sauerstoff und Mikroorganismen sowie der pH-Wert von wesentlicher Bedeutung.

Im laufenden Betrieb von Wärmeübertragern kommt es vor diesem Hintergrund zu Verschmutzungen und Ablagerungen an den wärmeübertragenden Flächen. Dieser als Fouling bezeichnete Vorgang führt zu einem erhöhten Wärmeübergangswiderstand der Wärmeübertragungsflächen. Der Prozess des Foulings kann durch verschiedene Mechanismen hervorgerufen werden, wobei an Wärmequellenanlagen in Fließgewässern eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber den Vorgängen der Korrosion, Sedimentation und des biologischen Wachstums besteht. Insbesondere das biologische Wachstum, auch Biofouling genannt, stellt eine große Herausforderung im Betrieb von Wärmeübertragern dar, da die Bildung von Biofilmen an den Wärmeübertragungsflächen nicht nur zu einer Verringerung der Entzugsleistung führt, sondern auch das Auftreten weiterer Foulingmechanismen begünstigt wird. Die wesentlichen Voraussetzungen für die Entstehung von Biofilmen sowie die damit verbundenen Prozesse wurden in dieser Arbeit ausführlich dargestellt. An metallischen Oberflächen kann zudem aufgrund von Korrosion eine Schädigung des Materials hervorgerufen werden. Zwar können auch an synthetischen Werkstoffen Korrosionserscheinungen auftreten, grundsätzlich sind Kunststoffe demgegenüber jedoch weit weniger empfindlich und bieten daher insbesondere im Hinblick auf den Kontakt mit natürlichen Gewässern ein geeignetes Material für Wärmequellenanlagen. Durch hohe Fließgeschwindigkeiten und Turbulenzen im Bereich des Wärmeübertragers kann das Auftreten von Foulingprozessen an den wärmeübertragenden Flächen reduziert werden. Eine regelmäßige Inspektion der Anlage sowie die Anwendung mechanischer Reinigungsmaßnahmen sind beim Einsatz von Wärmeübertragern in Fließgewässern jedoch nicht zu vermeiden.

Neben den Einflüssen der Wasserqualität kann auch das mitgeführte Feststoffmaterial in Fließgewässern zu einer Beeinträchtigung von Wärmequellenanlagen führen. Mechanische Schäden

oder Verlegungen am Wärmeübertrager können Betriebseinschränkungen verursachen bzw. aufwendige Reparatur- und Reinigungsmaßnahmen erforderlich machen. Die Feststoffe gelangen überwiegend aus dem Einzugsgebiet in das Gewässer und entstammen sowohl aus natürlichen als auch anthropogenen Quellen. In Abhängigkeit der Materialeigenschaften werden die Feststoffe mit der Strömung über den gesamten Fließquerschnitt hinweg transportiert. Die größte Gefahr für Wärmequellenanlagen stellt ein Zusammenstoß mit Schwimmstoffen, wie bspw. morschem Totholz, dar, da dieses unter der Wasseroberfläche schwebend transportiert wird und sich damit auf Fließhöhe des Wärmeübertragers befindet. Von Geschiebe an der Sohle und Schwemmgut an der Wasseroberfläche geht dagegen ein deutlich geringeres Risiko hinsichtlich mechanischer Schäden aus. Doch auch eine Sedimentation von sehr feinem Feststoffmaterial an den Wärmeübertragungsflächen kann zu einer Behinderung des Wärmetransports führen und damit den Betrieb der Wärmequellenanlage einschränken.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden am wärmeströmungstechnischen Prüfstand der Technischen Universität Darmstadt verschiedene Wärmeübertragersysteme für den Einsatz in Fließgewässern untersucht. Das „TwinSheet“-Muster zeichnete sich dabei gegenüber den Systemen „Stegplattenmuster“ und „Spiralmuster“ insbesondere durch ein deutlich höheres Durchflussvermögen aus. Für den Betrieb des „TwinSheet“-Musters ist damit ein geringerer Energieaufwand erforderlich, wodurch sich eine gesteigerte Energieeffizienz ergibt. Die Wärmeübertragersysteme „Stegplattenmuster“ und „Spiralmuster“ wurden zudem hinsichtlich der verringerten Entzugsleistung aufgrund von biologischem Bewuchs an den wärmeübertragenden Flächen untersucht. Dafür wurden die beiden Wärmeübertrager in einen Aufwuchsbehälter, dessen stoffliche Beschaffenheit einem natürlichen Fließgewässer nachempfunden wurde, eingebracht. Die anschließenden Messungen an den mit einem Biofilm überzogenen Wärmeübertragern belegten eine Verringerung der Wärmeentzugsleistung gegenüber den Messergebnissen des unverschmutzten Zustands. Das Ausmaß dieser Abweichung lag zwar in einem durchaus tolerierbaren Bereich, allerdings ist zu beachten, dass die Aufwuchszeit des Biofilms nur wenige Wochen betrug. Die Ablagerungen ließen sich zudem durch einfache Reinigungsmaßnahmen wieder von den Wärmeübertragungsflächen entfernen.

Für den Schutz der Wärmequellenanlagen vor einer Beeinträchtigung durch grobes Feststoffmaterial wurden Gestaltungsempfehlungen für Schutzkonstruktionen entwickelt. Die jeweilige Ausführung der Konstruktionen wird dabei durch die Größe der Anlage bestimmt. An kleinen Wärmequellenanlagen mit wenigen Komponenten eignet sich die Anbringung eines individuel-

len Einlaufschutzes direkt am Wärmeübertrager. Die Formgestaltung ist auf eine optimale Ableitung der auftreffenden Feststoffe und zugleich eine ausreichende Durchströmung der wärmeübertragenden Flächen ausgelegt. Werden mehrere Wärmeübertrager zu einer größeren Anlage kombiniert, empfiehlt sich die Anbringung eines Leitrechens im Oberlauf der Anlage. Dieser ist auf die Erzeugung einer Leitströmung ausgelegt, welche das anfallende Feststoffmaterial an der Wärmequellenanlage vorbeiführt. Jedoch ist auch hier auf eine ausreichende Durchströmung im Bereich der Wärmeübertrager zu achten. Diese Anforderungen werden sowohl von Horizontalstabrechen als auch Lochblechrechen erfüllt, weshalb diese als mögliche Ausführungsformen des Leitrechens geeignet sind. Außerdem ist für beide dieser Rechensysteme eine Reinigung in Längsrichtung möglich, wodurch eine Entnahme des Rechenguts vermieden werden kann.

Für eine praktische Anwendung der Schutzkonstruktionen sind diese jedoch im Vorfeld hinsichtlich ihrer Funktionalität sowie der auftretenden Strömungsverhältnisse zu untersuchen. Diese Überprüfung ist im Rahmen weiterer Arbeiten anhand numerischer Simulationsmodelle oder auch experimenteller Untersuchungen denkbar. Auch die Erkenntnisse der Biofilmbildung an den wärmeübertragenden Flächen sowie die damit verbundene Beeinträchtigung der Wärmeentzugsleistung können durch ergänzende Arbeiten vertieft werden. Mögliche Ansätze für weitere Untersuchungen liegen hierfür bspw. in der Ausprägung und Stabilität des Biofilms über einen längeren Zeitraum hinweg oder unter erschwerten Wachstumsbedingungen aufgrund einer kontinuierlichen Umströmung der Wärmeübertragungsflächen.

Abschließend lässt sich sagen, dass es sich bei Wärmequellenanlagen um eine zukunftsfähige und vielversprechende Technologie handelt, welche trotz verschiedenster Auswirkungen von Wasserqualität und Feststoffen auch in natürlichen Fließgewässern einsetzbar ist. Zwar wird die wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern auf lange Sicht vermutlich nur einen begrenzten Anteil an der globalen Energiegewinnung einnehmen, jedoch ist für eine langfristige Energieversorgung aus regenerativen Quellen ohnehin ein Mix aus verschiedensten Technologien erforderlich.

## Literaturverzeichnis

### Rechtsnormen und Rechtsakte

Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG vom 19.11.2008, Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, zuletzt geändert am 30.05.2018.

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) vom 24.02.2012, Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, zuletzt geändert am 20.07.2017.

Oberflächengewässerverordnung (OGewV) vom 20.06.2016, Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer.

Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vom 31.07.2009, Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts, zuletzt geändert am 4.12.2018.

Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) vom 23.10.2000, Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.

### Literatur

Adam, B. (2005): Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen. Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. 2. Auflage. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA); Hennef.

Bai, X.; Luo, T.; Cheng, K.; Chai, F. (2014): Experimental study on fouling in the heat exchangers of surface water heat pumps. In: Applied Thermal Engineering. 70 (1), S. 892–895.

Banning, M.; Helsper, U. (2010): Bericht zur Gewässergüte 2010; Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2013): Langzeitverhalten der Wassertemperaturen bayerischer Fließgewässer. Klimawandel und Wasserhaushalt in Bayern. Augsburg.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2018): Auswirkungen auf die Gewässertemperatur. Online verfügbar unter [https://www.lfu.bayern.de/wasser/klima\\_wandel/auswirkungen/gewaessertemperatur/index.htm](https://www.lfu.bayern.de/wasser/klima_wandel/auswirkungen/gewaessertemperatur/index.htm), zuletzt geprüft am 10.07.2019.

Berger, C. (2017): Rechenverluste und Auslegung von (elektrifizierten) Schrägrechen anhand ethohydraulischer Studien. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.

Berger, C.; Weibel, U. (2015): Kraftwerk Kostheim - Machbarkeitsstudie zur Realisierung des Fischschutzes und Fischabstiegs. Abschlussbericht; EnBW AG.

Böckh, P. von; Wetzel, T. (2017): Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis. 7. Auflage. Springer Vieweg; Berlin.

- Bohnet, M. (1985): Fouling von Wärmeübertragungsflächen. In: Chemie Ingenieur Technik. 57 (1), S. 24–36.
- Borchardt, S. (2018a): Wärmeströmungstechnischer Prüfstand. In: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (Hg.): WasserJahr. Technische Universität Darmstadt.
- Borchardt, S. (2018b): Wärmetechnische Nutzung von Fließgewässern. Gastbeitrag der Technischen Universität Darmstadt. In: Regierungspräsidium Darmstadt (Hg.): Journal für Arbeitsschutz und Umwelt.
- Borchardt, S. (2019a): Daten zu den untersuchten WQA. E-Mail; 18.11.2019, Darmstadt.
- Borchardt, S. (2019b): Legende. E-Mail; 13.12.2019, Darmstadt.
- Borchardt, S. (2019c): WG: Daten. E-Mail; 25.09.2019, Darmstadt.
- Braudrick, C. A. (1998): Entrainment, Transport, and Deposition of Large Woody Debris in Streams: Results from a Series of Flume Experiments; Master of Science Thesis, Oregon State University.
- Bundesamt für Energie, Schweiz (BFE) (2004): Wärmenutzung aus Abwasser. Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen. „Energie in Infrastrukturanlagen“; Bern.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2019): BGR Energiestudie 2018 - Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung; Hannover.
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (2014): Messungen mit dem Vectrino. BAW Empfehlung Ausgabe 2014; Karlsruhe.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2014): Gebäude. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/energieeffizienz/gebaeude/>, zuletzt geprüft am 16.12.2019.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2017): Die Klimakonferenz in Paris. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/#c8535>, zuletzt geprüft am 11.12.2019.
- Caissie, D. (2006): The thermal regime of rivers: a review. In: Freshwater Biology. 51, S. 1389–1406.
- Characklis, W. G. (1981): Microbial fouling: a process analysis. In: E. F. C. Somerscales und J. G. Knudsen (Hg.): Fouling of heat transfer equipment. Washington DC: Hemisphere Publ. Corp., S. 251–291.
- Characklis, W. G. (1990a): Microbial biofouling control. In: W. G. Characklis und K. C. Marshall (Hg.): Biofilms. New York: John Wiley & Sons.
- Characklis, W. G. (1990b): Microbial Fouling. In: W. G. Characklis und K. C. Marshall (Hg.): Biofilms. New York: John Wiley & Sons.
- Characklis, W. G.; Nevimons, M. J.; Picologlou, B. F. (1981): Influence of Fouling Biofilms on Heat Transfer. In: Heat Transfer Engineering. 3 (1), S. 23–37.

- Chen, X.; Zhang, G. (2014): Study on the application of closed-loop lake water heat pump systems for lakefront buildings in south China climates. In: *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 6 (3), S. 33125.
- Costerton, J. W.; Cheng, K. J.; Geesey, G. G.; Ladd, T. I.; Nickel, J. C.; Dasgupta, M.; Marrie, T. J. (1987): Bacterial biofilms in nature and disease. In: *Annual review of microbiology* (41), S. 435–464.
- Davies, D. (2003): Understanding biofilm resistance to antibacterial agents. In: *Nature reviews. Drug discovery*. 2 (2), S. 114–122.
- Demski, H.-O. (2005a): Fouling in Wärmeübertragungsapparaten. In: H.-O. Demski (Hg.): *Handbuch Kompakt-Wärmeübertrager. Bauarten - Materialien - Anwendungen*. Essen: PP Publico Publications.
- Demski, H.-O. (2005b): Kompaktwärmeübertragungsapparate. In: H.-O. Demski (Hg.): *Handbuch Kompakt-Wärmeübertrager. Bauarten - Materialien - Anwendungen*. Essen: PP Publico Publications.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2008): Wer verbraucht in Deutschland die meiste Energie? Energieverbrauch der Heizung oftmals unterschätzt. Online verfügbar unter <https://www.presseportal.de/pm/43338/1208607>, zuletzt geprüft am 12.12.2019.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (2008): *Rechengutbehandlung an Gewässern*. DWA-Themen; Hennef.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (2017): *Merkmale DWA-M 517. Gewässermonitoring - Strategien und Methoden zur Erfassung der physikalisch-chemischen Beschaffenheit von Fließgewässern*. DWA-Regelwerk; Hennef.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (1997): *Wasserwirtschaftliche Bedeutung der Festlegung und Freisetzung von Nährstoffen durch Sedimente in Fließgewässern*. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH (WVGW); Bonn.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (1998): *Einträge aus diffusen Quellen in die Fließgewässer. Nähr- und Feststoffe*. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH (WVGW); Bonn.
- DIN 4049-2:1992-04: *Hydrologie. Begriffe der Gewässerbeschaffenheit*. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth; Berlin.
- DIN 4049-1:1992-12: *Hydrologie. Grundbegriffe*. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth; Berlin.
- DIN 38410:2003-06: *Biologisch-ökologische Gewässeruntersuchung (Gruppe M). Teil 1: Bestimmung des Saprobienindex in Fließgewässern (M 1)*. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth; Berlin.
- DIN EN 60751:2009-05: *Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatur-sensoren (IEC 60751:2008)*; Deutsche Fassung EN 60751:2008. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth; Berlin.



- DIN EN ISO 8044:2019-03: Korrosion von Metallen und Legierungen – Grundbegriffe (ISO/DIS 8044:2019); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 8044:2019. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth; Berlin.
- Eckel, O.; Reuter, H. (1950): Zur Berechnung des sommerlichen Wärmeumsatzes in Flussläufen. In: Geografiska Annaler. 32, S. 188–209.
- Endress+Hauser Management AG (2019): Magnetisch-induktive Durchflussmessung. Online verfügbar unter <https://www.de.endress.com/de/messgeraete-fuer-die-prozesstechnik/durchflussmessung-produktuebersicht/Magnetisch-induktive-Durchflussmessung>, zuletzt geprüft am 16.11.2019.
- Engel, A. P.; Weber, E. (2003): Lochblechrechen - neue Anwendungen einer alten Technik. In: Wasserwirtschaft. 93 (6), S. 42–44.
- Epstein, N. (1981): Fouling: Technical aspects. In: E. F. C. Somerscales und J. G. Knudsen (Hg.): Fouling of heat transfer equipment. Washington DC: Hemisphere Publ. Corp., S. 31–53.
- examio GmbH (o.J.): Wärmeübertragung: Wärmeleitung. Laminare und turbulente Grenzschicht. Online verfügbar unter <https://www.ingenieurkurse.de/waermeuebertragung-waermeleitung/erzwungene-konvektion/laminare-und-turbulente-grenzschicht.html>, zuletzt geprüft am 09.10.2019.
- Flemming, H.-C. (1994): Biofilme, Biofouling und mikrobielle Schädigung von Werkstoffen. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft. Oldenbourg; München.
- Flemming, H.-C. (1995a): Biofouling bei Membranprozessen. Springer; Berlin.
- Flemming, H.-C. (1995b): Metalle. In: H. Brill (Hg.): Mikrobielle Materialzerstörung und Materialschutz. Schädigungsmechanismen und Schutzmaßnahmen. Jena: Fischer.
- Gibietz, O. (2019): Funktionsweise Pt100. Online verfügbar unter <https://temperatur-profis.de/wissen/temperaturfuehler/funktionsweise-pt100/>, zuletzt geprüft am 16.11.2019.
- Giesecke, J.; Heimerl, S. (2000): Treibgut an Wasserkraftanlagen - ist die vollständige Entnahme heute noch zeitgemäß? In: Wasserwirtschaft. 90 (6), S. 294–299.
- Giesecke, J.; Heimerl, S.; Mosonyi, E. (2014): Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb. 6. Auflage. Springer Vieweg; Berlin.
- Gluch, A. (2007): Kombiniertes Fisch- und Treibgutableiter für Wasserkraftanlagen. In: Wasser und Abfall. 9 (7-8), S. 38–43.
- Haag, I. (2009): Die mögliche Wirkung des Klimawandels auf Wassertemperaturen von Fließgewässern. Erläuterungsbericht. WWF Deutschland; Frankfurt am Main.
- Hackl, M. (2017): Verklausungen in der Triesting. Online verfügbar unter [https://www.meinbezirk.at/triestingtal/c-lokales/verklausungen-in-der-triesting\\_a2059467#gallery=null](https://www.meinbezirk.at/triestingtal/c-lokales/verklausungen-in-der-triesting_a2059467#gallery=null), zuletzt geprüft am 27.08.2019.

- Haimann, M.; Aigner, J.; Gmeiner, P.; Lalk, P.; Habersack, H. (2018): Hochwasser und Feststoffe: vom Sedimenttransport zum flussmorphologischen Raumbedarf. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. 70 (1-2), S. 78–89.
- Hamerak, K. (1996): Durch Wasserkraft betriebene Wärmepumpe beheizt Bamberger Mühlenviertel. In: Wasserkraft & Energie (4), S. 44–53.
- Heinemann, K.-J. (2004): Kunststoffkorrosion - gibt's das wirklich? Umgebungseinflüsse auf Kunststoffe und ihre negativen Folgen. In: IKZ-HAUSTECHNIK (4), S. 24–27.
- Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M. (2016): Physik für Ingenieure. 12. Auflage. Springer Vieweg; Berlin.
- Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM) (2019): Was ist ein Druckaufnehmer? Online verfügbar unter <https://www.hbm.com/de/7646/was-ist-ein-druckaufnehmer/>, zuletzt geprüft am 26.11.2019.
- HUBER SE (2019): Rechen, Fein- und Feinstsiebe. Online verfügbar unter <https://www.huber.de/de/produkte/rechen-fein-und-feinstsiebe.html>, zuletzt geprüft am 12.12.2019.
- Huesmann, K. (1966): Eigenschaften turbulenter Strahlenbündel. In: Chemie Ingenieur Technik. 38 (3), S. 293–297.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. World Meteorological Organization; Geneva, Switzerland.
- Internationale Energieagentur (IEA) (2019): Global energy demand rose by 2.3% in 2018, its fastest pace in the last decade. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/news/global-energy-demand-rose-by-23-in-2018-its-fastest-pace-in-the-last-decade>, zuletzt aktualisiert am 26.03.2019, zuletzt geprüft am 10.12.2019.
- Isenburg, T. (2009): Belagbildung vermeiden. Beschichtung von Wärmeübertragungsflächen. In: JOT Journal für Oberflächentechnik. 49 (5), S. 50–51.
- Jaruga, M. (2019): Pt100 Temperaturfühler. Online verfügbar unter <https://www.fuehlersysteme.de/wiki/pt100>, zuletzt geprüft am 16.11.2019.
- Krause, S. (1986): Fouling an Wärmeübertragungsflächen durch Kristallisation und Sedimentbildung. VDI-Forschungsheft 637. VDI-Verlag; Düsseldorf.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (1991): Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer. 3. Auflage. Erich Schmidt; Berlin.
- Lange, G.; Lecher, K. (1993): Gewässerregelung, Gewässerpflege. Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern. 3. Auflage. Parey; Hamburg.
- Langeheinecke, K.; Kaufmann, A.; Langeheinecke, K.-J.; Thieleke, G. (2017): Thermodynamik für Ingenieure. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium. 10. Auflage. Springer Vieweg; Wiesbaden.

- Marek, R.; Nitsche, K. (2015): Praxis der Wärmeübertragung. Grundlagen - Anwendungen - Übungsaufgaben. 4. Auflage. Carl Hanser Fachbuchverlag; Leipzig.
- Matosovic, A. (2005): Problemlösung zur Reinigung bei organischem Bewuchs in Kühlwasserkreisläufen mittels Spaltrohrfiltern. In: H.-O. Demski (Hg.): Handbuch Kompakt-Wärmeübertrager. Bauarten - Materialien - Anwendungen. Essen: PP Publico Publications.
- Meusburger, H. (2002): Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie; ETH Zürich.
- Meyer, J. L.; McDowell, W. H.; Bott, T. L.; Elwood, J. W.; Ishizaki, C.; Melack, J. M. et al. (1988): Elemental Dynamics in Streams. In: Journal of the North American Benthological Society. 7 (4), S. 410–432.
- Meyer, M. (2018): Joseph-Stiftung - Kontakformular: Rü. wg. Wärmepumpenanlage Obere Mühlen. E-Mail an Lukas Abel; 02.05.2018, Bamberg.
- microsonic GmbH (2019): Betriebsanleitung. mic+ Ultraschallsensoren mit einem Analogausgang. Online verfügbar unter <https://www.microsonic.de/DocumentHandler.ashx?id=134378&did=1&langid=1031>, zuletzt geprüft am 27.11.2019.
- Müller-Steinhagen, H.; Malayeri, M. R.; Watkinson, A. P. (2011): Heat Exchanger Fouling: Mitigation and Cleaning Strategies. In: Heat Transfer Engineering. 32 (3-4), S. 189–196.
- Nortek AS (2017): The Comprehensive Manual. AWAC - Aquadopp - Aquadopp Profiler - 2D Horizontal Profiler - Vector - Vectrino. Nortek Manuals.
- Patt, H. (2018): Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. 5. Auflage. Springer; Wiesbaden.
- Peter, M. (1997): Herausnahme, Umladen und Transportieren von Geschwemmsel. In: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband (Hg.): Entsorgung von Geschwemmsel. Technik - Kosten - Zukunft. Baden, S. 13-22.
- Pommer, E.-H. (1995): Synthetische organische Materialien. In: H. Brill (Hg.): Mikrobielle Materialzerstörung und Materialschutz. Schädigungsmechanismen und Schutzmaßnahmen. Jena: Fischer.
- Pusch, M.; Feld, C.; Hoffmann, A. (1999): Schwemmgut - kostenträchtiger Müll oder wertvolles Element von Flußökosystemen? In: Wasserwirtschaft. 89 (6), S. 280–284.
- Raymond, J.; Therrien, R.; Gosselin, L. (2007): Geothermal energy resources of active mines. In: Montreal Energy & Mines. April 29-May 2 2007, Montreal, S. 279–286.
- Reinartz, R. (2007): Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süßwasserfische Bayerns. Literaturstudie im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, Referat 57 / Gewässerökologie.
- Reppich, M.; Babinec, F.; Dohnai, M. (1993): Bestimmung des Foulingfaktors an Wärmeübertragungsflächen mit Hilfe einer Fuzzy-Wissensbasis. In: Forschung im Ingenieurwesen - Engineering Research. 59 (5), S. 97–101.

- Schmid, T.; Panne, U.; Haisch, C.; Nießner, R. (2003): Biofilm monitoring by photoacoustic spectroscopy. In: *Water Science and Technology*. 47 (5), S. 25–29.
- Schmitt, G. (2004): Der Korrosionsbegriff bei nichtmetallischen Werkstoffen. In: *Materials and Corrosion*. 55 (5), S. 367–372.
- Schnell, H. (1988): Verschmutzung. In: F. Steimle und R. Plank (Hg.): *Handbuch der Kältetechnik*. 6. Band, Wärmeaustauscher. Berlin: Springer.
- Schnell, H.; Slipcević, B. (1990): *Wärmeaustauscher. Rohrbündel-Wärmeaustauscher ; Grundlagen, Aufbau, Anwendung*. expert-Verlag; Ehningen bei Böblingen.
- Scholt, D. (1981): Flusswärmetauscher für eine Wärmepumpenanlage. In: *DIE KÄLTE + Klimatechnik*. 34 (5), S. 178,180,182.
- Schwoerbel, J.; Brendelberger, H. (2013): *Einführung in die Limnologie*. 10. Auflage. Springer Spektrum; Berlin.
- Shields, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffbau*; Berlin.
- Sigg, L.; Stumm, W. (2011): *Aquatische Chemie. Einführung in die Chemie natürlicher Gewässer*. 5. Auflage. vdf Hochschul-Verlag; Zürich.
- Slipcević, B. (1988): Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion. In: F. Steimle und R. Plank (Hg.): *Handbuch der Kältetechnik*. 6. Band, Wärmeaustauscher. Berlin: Springer.
- Spitler, J. D.; Mitchell, M. S. (2016): Surface water heat pump systems. In: S. J. Rees (Hg.): *Advances in ground-source heat pump systems*. Duxford, UK: Elsevier.
- Stieglitz, R. (2012): *Thermische Solarenergie. Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Springer Vieweg; Berlin.
- Täubert, U. (1974): Wasserwirtschaftliche Systemanalyse des Wärmehaushalts von Flüssen. *Wasserbau-Mitteilungen Nr.12*; TH Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.
- TEMA (1978): *Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association*. 6. Auflage. New York.
- Umweltbundesamt (UBA) (2003): Entwicklung eines leitbildorientierten Saprobienindex für die biologische Fließgewässerbewertung. Erarbeitung durch die Universität Essen, Institut für Ökologie, Abteilung Hydrobiologie.
- Umweltbundesamt (UBA) (2017): *Gewässer in Deutschland: Zustand und Bewertung*. Dessau-Roßlau.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2013): *VDI-Wärmeatlas*. Springer Berlin Heidelberg; Berlin.
- Vergaro, A. (2014): Large woody debris in river channels - hazard and dynamics. Dissertation. University of Braunschweig, University of Florence.

Wunderlich, M. (1979): Auswirkungen des Wärmeentzugs auf die Güte von Oberflächengewässern. In: W.-D. Glatzel und K.-D. Heise (Hg.): Wärmepumpen und Gewässerschutz. Ökologische Auswirkungen von Wärmepumpen mit Wärmeentzug aus Wasser. Berlin: S. 183-194.

Zanke, U. (2013): Hydraulik für den Wasserbau. 3. Auflage. Springer; Berlin.

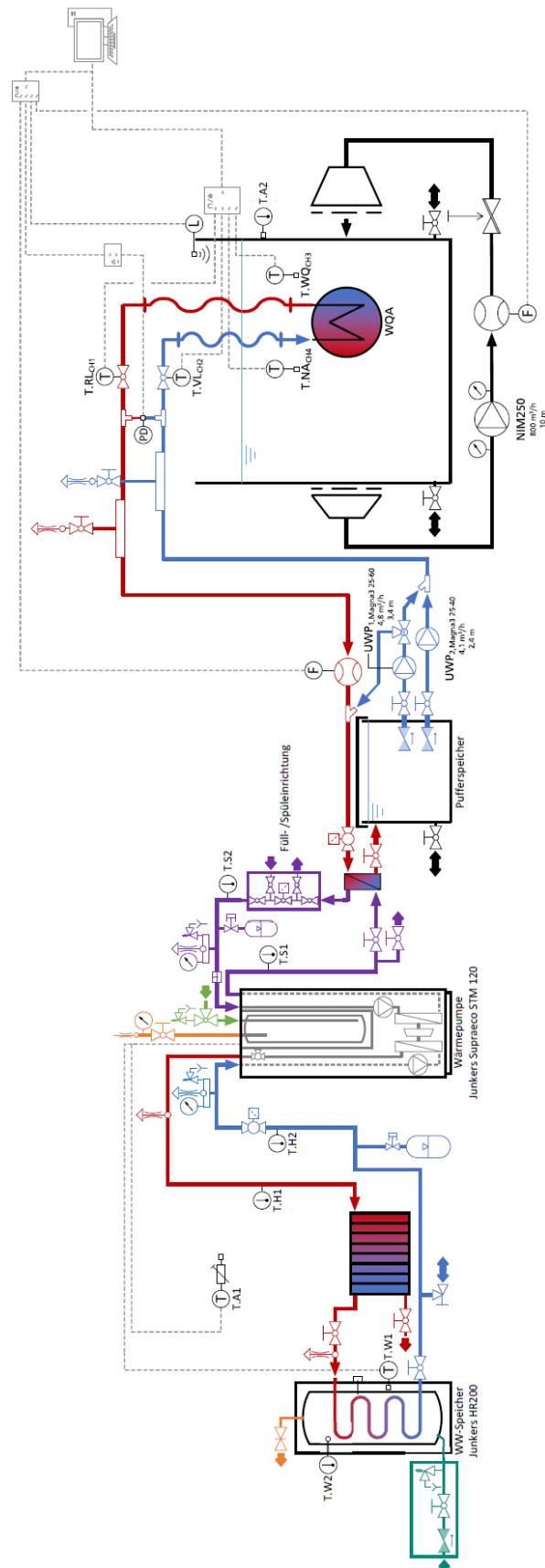
















































## Anhang

Anhang I	Anlagenschema des Prüfstands
Anhang II	Zeitlicher Ablauf der Biofilmerzeugung
Anhang III	Pumpenkennlinien der Umwälzpumpe
Anhang IV	Messdaten am „TwinSheet“-Muster
Anhang V	Messdaten am „Stegplattenmuster“
Anhang VI	Messdaten am „Spiralmuster“
Anhang VII	Messergebnisse ADV



## Anhang I      Anlagenschema des Prüfstandes (Borchardt 2019b, o. S.)

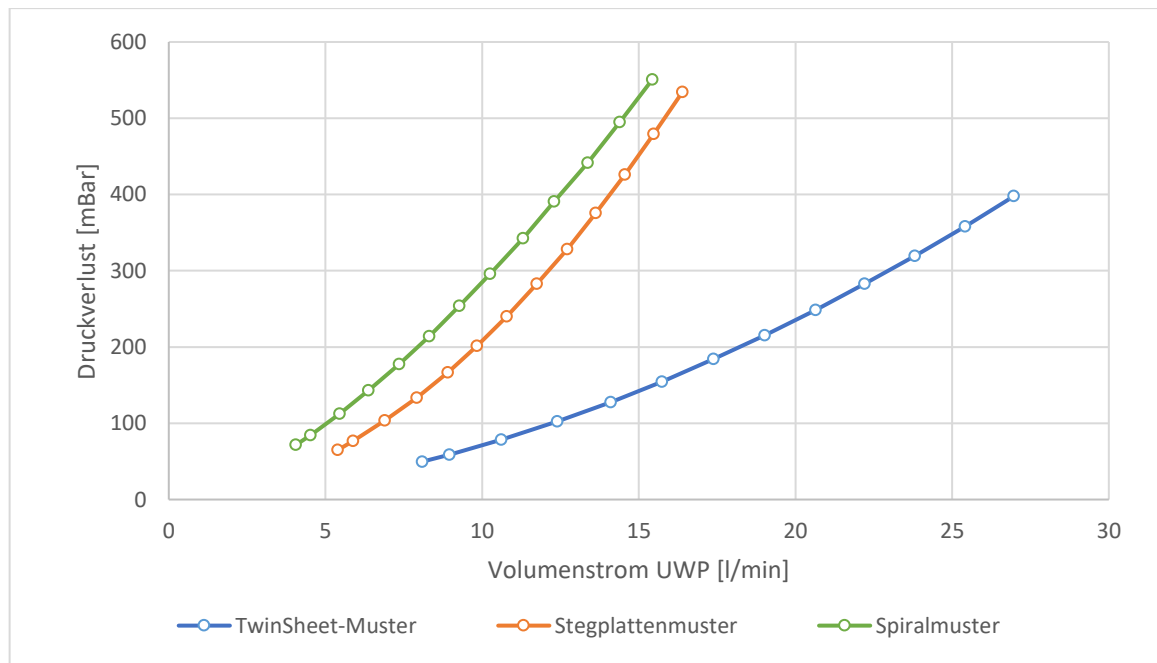


	Vorlauf Heizung		Rückschlagventil		Absperrhahn in Eckform		Lufabscheider		Konfuser / Diffusor		Messaufnehmer
	Rücklauf Heizung		Absperrhahn		Absperrhahn in Eckform		Automatischer Entlüfter		Wasserspiegel		Ultraschall
	Vorlauf WQA		Absperrhahn mit Filter		3-Wege-Hahn		Ausdehnungsgefäß		Lochsieb		einstellbarer Widerstand
	Sole		Kugelhahn		Absperschieber		Luftsammelgefäß		Volumenstrommessung		Analog/Digital-Messwandler
	Warmwasser		Kappenventil		Kappenventil		Pumpe		Thermometer		Messverstärker
	Trinkwasser		Kugelhahn		Kugelhahn mit Filter		Wärmeüberträger		Manometer (analog)		Ausgabegerät
	Wasserkreislauf Wärmequelle		Kugelhahn mit Messstutzen		Drosselklappe		Wärmequellenanlage		Temperatur (analog)		
	Elektrische Verdrängung		Umkehrbare Flüsse		Umkehrbare Flüsse		Radiator		Differenzdruck		
	ein- & ausgehende Flüsse		Schlauch		Schlauch		Stromtrennung Messstutzen		Füllstand		
	Fließrichtung						Stromzusammenführung		Durchfluss		

## Anhang II Zeitlicher Ablauf des Biofoulingprozesses

Datum	Tätigkeiten
18.09.2019	Befüllen des Behälters mit Frischwasser; Einbringen der beiden Wärmeübertrager; Zugabe von Biofilmsubstrat aus dem Versuchsbecken
19.09.2019	Zugabe von Wasser aus dem Darmbach mit Blättern, Wasserpflanzen, Bodensubstrat und Kleinstlebewesen
24.09.2019	Einbringen von organischem Material (Totholz, Falllaub, Gräser, Zweige)
26.09.2019	Zugabe von Wasser aus dem Darmbach mit Bodensubstrat
08.10.2019	Einbringen von organischem Material (Moos, Zweige, Pflanzenreste)
15.10.2019	Einbringen von organischem Material (Humus, Falllaub, Totholz)
31.10.2019	Einbau des Wärmeübertragers „Stegplattenmuster“ in den Prüfstand
06.-08.11.2019	Durchführung der Messungen am Stegplattenmuster
12.11.2019	Einbau des Wärmeübertragers „Spiralmuster“ in den Prüfstand
19.-21.11.2019	Durchführung der Messungen am Spiralmuster
05.12.2019	Reinigungsmaßnahmen an den Wärmeübertragersystemen

## Anhang III Pumpenkennlinien der Umwälzpumpe



## Messdaten Pumpenkennlinie „TwinSheet“-Muster

Pumpenkennlinie TwinSheet-Muster									
n [%]	Q <sub>UWP</sub> [l/s]	Q <sub>min</sub> [l/s]	Q <sub>max</sub> [l/s]	Q <sub>Schwankung</sub> [l/s]	Q <sub>UWP</sub> [l/min]	Δp [mbar]	Δp <sub>Min</sub> [mbar]	Δp <sub>Max</sub> [mbar]	Δp <sub>Schwankung</sub> [mbar]
100	0,4496	0,448	0,451	0,0030	27	397,8	396,920	398,620	1,70
95	0,4236	0,422	0,426	0,0040	25	358,1	357,120	358,980	1,86
90	0,3970	0,396	0,398	0,0020	24	319,5	319,160	319,850	0,69
85	0,3702	0,370	0,371	0,0010	22	282,9	282,580	283,330	0,75
80	0,3441	0,344	0,345	0,0010	21	248,4	247,280	248,670	1,39
75	0,3170	0,316	0,318	0,0020	19	215,5	215,120	216,300	1,18
70	0,2897	0,289	0,291	0,0020	17	184,2	183,730	184,770	1,04
65	0,2624	0,262	0,263	0,0010	16	154,4	154,3	154,93	0,63
60	0,2352	0,235	0,236	0,0010	14	127,6	127,3	128,08	0,78
55	0,2068	0,206	0,207	0,0010	12	102,6	102,27	103,34	1,07
50	0,1769	0,176	0,178	0,0020	11	78,6	78,43	78,88	0,45
45	0,1493	0,148	0,15	0,0020	9	58,9	58,29	59,64	1,35
40	0,1348	0,134	0,136	0,0020	8	49,7	49,06	74,94	25,88

## Messdaten Pumpenkennlinie „Stegplattenmuster“

Pumpenkennlinie Stegplattenmuster									
n [%]	Q [l/s]	Q <sub>min</sub> [l/s]	Q <sub>max</sub> [l/s]	Q <sub>Schwankung</sub> [l/s]	Q [l/min]	Δp [mbar]	Δp <sub>Min</sub> [mbar]	Δp <sub>Max</sub> [mbar]	Δp <sub>Schwankung</sub> [mbar]
100	0,273	0,273	0,274	0,001	16,4	534,455	530,530	534,950	4,420
95	0,258	0,258	0,259	0,001	15,5	479,385	478,980	479,940	0,960
90	0,243	0,242	0,243	0,001	14,6	426,063	425,420	428,020	2,600
85	0,227	0,227	0,228	0,001	13,6	375,773	375,450	377,020	1,570
80	0,212	0,211	0,212	0,001	12,7	328,484	328,080	330,110	2,030
75	0,196	0,195	0,196	0,001	11,8	283,043	282,800	283,890	1,090
70	0,180	0,179	0,180	0,001	10,8	240,223	239,790	241,760	1,970
65	0,164	0,164	0,164	0,000	9,8	201,667	201,440	202,360	0,920
60	0,148	0,148	0,149	0,001	8,9	166,689	166,380	168,400	2,020
55	0,132	0,132	0,132	0,000	7,9	133,522	133,190	134,880	1,690
50	0,115	0,115	0,116	0,001	6,9	103,523	103,290	103,860	0,570
45	0,098	0,098	0,099	0,001	5,9	77,014	76,650	78,570	1,920
41	0,090	0,090	0,090	0,000	5,4	64,983	64,810	65,650	0,840

## Messdaten Pumpenkennlinie „Spiralmuster“

Pumpenkennlinie Spiralmuster									
n [%]	Q [l/s]	Q <sub>min</sub> [l/s]	Q <sub>max</sub> [l/s]	Q <sub>Schwankung</sub> [l/s]	Q [l/min]	Δp [mbar]	Δp <sub>Min</sub> [mbar]	Δp <sub>Max</sub> [mbar]	Δp <sub>Schwankung</sub> [mbar]
100	0,257	0,257	0,259	0,002	15,4	550,979	550,290	551,360	1,070
95	0,240	0,240	0,258	0,018	14,4	494,916	495,320	551,490	56,170
90	0,223	0,223	0,241	0,018	13,4	441,659	441,440	495,440	54,000
85	0,205	0,205	0,223	0,018	12,3	390,881	390,580	441,970	51,390
80	0,188	0,188	0,206	0,018	11,3	342,475	342,150	391,060	48,910
75	0,171	0,170	0,189	0,019	10,3	296,127	295,710	342,750	47,040
70	0,155	0,139	0,171	0,032	9,3	254,063	214,690	296,270	81,580
65	0,139	0,122	0,139	0,017	8,3	214,188	177,550	214,580	37,030
60	0,123	0,104	0,123	0,019	7,4	177,754	142,920	177,960	35,040
55	0,106	0,090	0,107	0,017	6,4	143,241	112,160	143,760	31,600
50	0,091	0,075	0,092	0,017	5,5	112,405	83,830	112,790	28,960
45	0,075	0,067	0,076	0,009	4,5	84,337	71,340	84,580	13,240
41	0,068	0,067	0,069	0,002	4,1	71,617	71,500	71,820	0,320

# Anhang IV Messdaten am „TwinSheet“-Muster

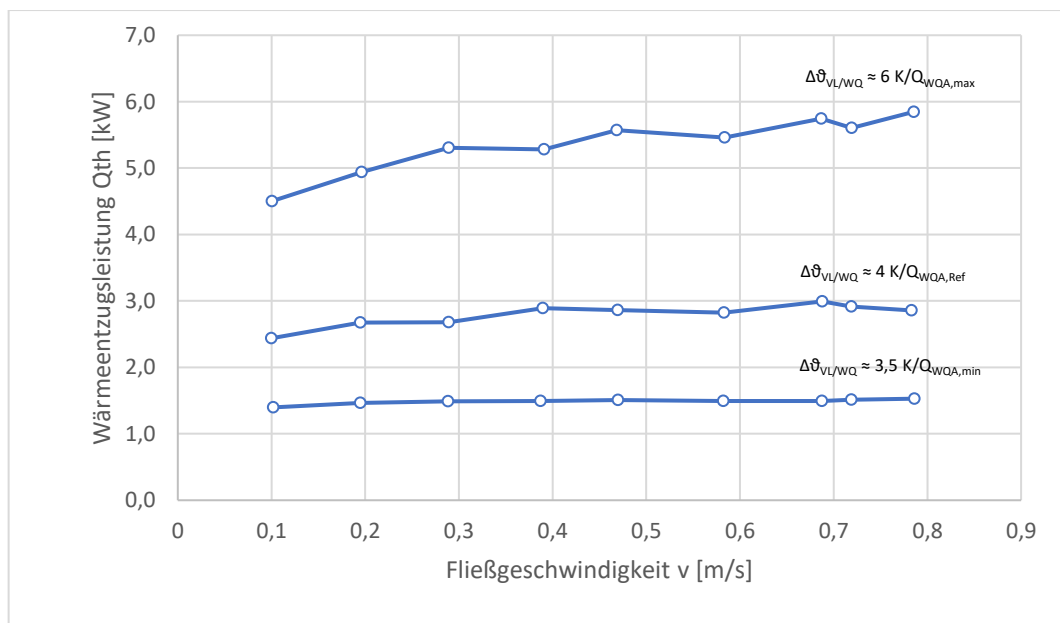
TwinSheet-Muster Betriebszustand (Messreihe 1)																			
Zeitpunkt [hh:mm]	Q <sub>Rinne</sub> [l/s]	h <sub>WSP</sub> [cm]	n <sub>UWP</sub> [%]	Q <sub>WQA</sub> [l/s]	Q <sub>WQA</sub> [l/min]	ρ <sub>RL,CH1</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	ρ <sub>VL,CH2</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>in</sub> [kg/s]	T <sub>RL,CH1</sub> [°C]	T <sub>VL,CH2</sub> [°C]	T <sub>RI,CH3</sub> [°C]	T <sub>RI,CH4</sub> [°C]	Δθ <sub>RL-VL</sub> [K]	c <sub>p,CH1</sub> [kJ/(kg·K)]	c <sub>p,CH2</sub> [kJ/(kg·K)]	Q <sub>th</sub> [kW]	q <sub>th</sub> [kW/m <sup>2</sup> ]	Δθ <sub>RI,CH3-VL</sub> [K]	Δθ <sub>RI,CH3-VL</sub> [K]
13:46	22,2	180	100	0,441	26,483	998,775	999,169	0,441	17,027	14,537	20,672	20,677	2,490	4,187	4,189	4,569	1,384	6,135	6,0
13:49	22,2	180	90	0,390	23,385	998,726	999,150	0,389	17,300	14,668	20,675	20,671	2,632	4,187	4,189	4,265	1,291	6,007	
15:26	22,2	180	80	0,337	20,211	998,684	999,149	0,336	17,534	14,674	20,664	20,670	2,860	4,186	4,189	4,004	1,212	5,991	
15:29	22,2	180	70	0,283	16,950	998,634	999,151	0,282	17,811	14,659	20,651	20,663	3,153	4,186	4,189	3,701	1,121	5,992	
15:32	22,2	180	66	0,261	15,684	998,609	999,149	0,261	17,952	14,673	20,653	20,659	3,279	4,186	4,189	3,562	1,079	5,980	
15:54	22,2	180	60	0,229	13,743	998,573	999,154	0,229	18,141	14,641	20,652	20,657	3,500	4,186	4,189	3,332	1,009	6,011	
15:57	22,2	180	50	0,172	10,324	998,487	999,158	0,172	18,593	14,615	20,652	20,661	3,978	4,186	4,189	2,845	0,861	6,036	
16:23	22,2	180	41	0,130	7,813	998,425	999,166	0,130	18,921	14,561	20,657	20,670	4,361	4,186	4,189	2,361	0,715	6,097	
09:46	22,2	180	100	0,439	26,327	998,881	999,180	0,438	16,369	14,465	19,108	19,119	1,904	4,188	4,190	3,475	1,052	4,644	4,5
09:49	22,2	180	90	0,387	23,220	998,848	999,165	0,387	16,573	14,566	19,107	19,117	2,007	4,187	4,189	3,230	0,978	4,541	
09:52	22,2	180	80	0,335	20,110	998,814	999,155	0,335	16,789	14,634	19,107	19,119	2,155	4,187	4,189	3,003	0,909	4,473	
10:15	22,2	180	70	0,280	16,819	998,788	999,181	0,280	16,947	14,459	19,101	19,111	2,488	4,187	4,190	2,900	0,878	4,642	
10:18	22,2	180	66	0,260	15,574	998,767	999,169	0,259	17,072	14,542	19,098	19,114	2,530	4,187	4,189	2,731	0,827	4,556	
10:40	22,2	180	60	0,226	13,589	998,738	999,174	0,226	17,232	14,506	19,098	19,112	2,726	4,187	4,189	2,566	0,777	4,592	
10:43	22,2	180	50	0,170	10,225	998,684	999,174	0,170	17,532	14,504	19,101	19,114	3,028	4,186	4,189	2,145	0,649	4,597	
10:46	22,2	180	41	0,129	7,739	998,625	999,160	0,129	17,860	14,598	19,103	19,116	3,262	4,186	4,189	1,749	0,529	4,505	
11:26	22,2	180	100	0,440	26,402	998,730	998,942	0,439	17,278	15,987	19,110	19,126	1,292	4,187	4,188	2,361	0,715	3,123	3,0
11:29	22,2	180	90	0,388	23,307	998,706	998,932	0,388	17,412	16,051	19,113	19,127	1,361	4,187	4,188	2,196	0,665	3,061	
11:32	22,2	180	80	0,336	20,175	998,678	998,923	0,336	17,569	16,106	19,118	19,128	1,462	4,186	4,188	2,042	0,618	3,011	
11:35	22,2	180	70	0,282	16,921	998,644	998,910	0,282	17,755	16,186	19,114	19,136	1,569	4,186	4,188	1,837	0,556	2,928	
11:48	22,2	180	66	0,260	15,617	998,650	998,946	0,260	17,723	15,966	19,136	19,145	1,757	4,186	4,188	1,900	0,575	3,170	
11:51	22,2	180	60	0,228	13,673	998,622	998,932	0,228	17,876	16,053	19,134	19,149	1,823	4,186	4,188	1,725	0,522	3,082	
11:54	22,2	180	50	0,171	10,283	998,578	998,922	0,171	18,113	16,115	19,140	19,147	1,999	4,186	4,188	1,423	0,431	3,025	
11:57	22,2	180	41	0,130	7,795	998,537	998,909	0,130	18,334	16,193	19,135	19,155	2,140	4,186	4,188	1,155	0,350	2,942	
13:37	22,2	180	100	0,441	26,461	998,594	998,716	0,440	18,034	17,354	19,004	18,990	0,680	4,186	4,187	1,245	0,377	1,650	1,5
13:40	22,2	180	90	0,389	23,351	998,579	998,709	0,389	18,112	17,395	18,992	18,977	0,717	4,186	4,187	1,159	0,351	1,597	
13:43	22,2	180	80	0,337	20,217	998,565	998,704	0,336	18,186	17,425	18,982	18,976	0,761	4,186	4,187	1,066	0,323	1,557	
13:46	22,2	180	70	0,283	16,973	998,546	998,698	0,282	18,282	17,457	18,972	18,978	0,825	4,186	4,187	0,969	0,294	1,514	
13:49	22,2	180	66	0,262	15,702	998,538	998,694	0,261	18,328	17,479	18,971	18,983	0,849	4,186	4,187	0,923	0,280	1,492	
14:10	22,2	180	60	0,228	13,700	998,530	998,706	0,228	18,370	17,413	19,000	19,016	0,958	4,186	4,187	0,909	0,275	1,587	
14:13	22,2	180	50	0,172	10,308	998,506	998,700	0,172	18,496	17,443	19,001	19,021	1,053	4,186	4,187	0,752	0,228	1,558	
14:16	22,2	180	41	0,130	7,801	998,484	998,694	0,130	18,609	17,476	19,012	19,031	1,133	4,186	4,187	0,613	0,185	1,536	

TwinSheet Einfluss Fließgeschwindigkeit (Messreihe 2)																					
Zeitpunkt [hh:mm]	$v_{Rinne}$ [m/s]	$h_{WSP}$ [cm]	$n_{UWP}$ [%]	$Q_{WQA}$ [l/s]	$Q_{WQA}$ [l/min]	$\rho_{RLCH1}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{VLCH2}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\dot{q}_m$ [kg/s]	$T_{RLCH1}$ [°C]	$T_{VLCH2}$ [°C]	$T_{RI,CH3}$ [°C]	$T_{RI,CH4}$ [°C]	$\Delta\vartheta_{RL-VL}$ [K]	$c_{p,CH1}$ [kJ/(kg·K)]	$c_{p,CH2}$ [kJ/(kg·K)]	$\dot{Q}_{th}$ [kW]	$\dot{q}_{th}$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$\Delta\vartheta_{RI,CH3-VL}$ [K]	$\Delta\vartheta_{RI,CH3-VL}$ [K]	$v_{Rinne}$ [m/s]	
12:16	28,4	0,1	180		0,44	26,4	999,310	999,601	13,536	11,080	17,107	17,123	2,456	4,190	4,194	4,502	1,363	6,027		0,100	
13:22	55,5	0,2	180		0,44	26,4	999,282	999,604	13,752	11,056	17,110	17,102	2,696	4,190	4,194	4,942	1,496	6,054		0,196	
14:13	81,7	0,3	180		0,44	26,4	999,256	999,603	13,955	11,062	17,183	17,181	2,893	4,190	4,194	5,304	1,606	6,122		0,289	
14:16	110,5	0,4	180		0,44	26,4	999,231	999,583	14,124	11,241	17,183	17,183	2,882	4,190	4,194	5,283	1,600	5,941		0,391	
14:49	132,4	0,5	180	100	0,44	26,4	999,223	999,594	14,181	11,142	17,243	17,241	3,040	4,190	4,194	5,572	1,687	6,101	6	0,468	
14:52	165	0,6	180		0,44	26,4	999,201	999,572	14,328	11,350	17,244	17,243	2,978	4,190	4,194	5,458	1,653	5,894		0,584	
15:26	194,2	0,7	180		0,44	26,4	999,186	999,578	14,427	11,293	17,407	17,409	3,133	4,190	4,194	5,742	1,739	6,113		0,687	
15:29	203,3	0,7x	180		0,44	26,4	999,169	999,557	14,543	11,483	17,416	17,419	3,060	4,189	4,194	5,607	1,698	5,933		0,719	
16:00	222,1	0,8	180		0,44	26,4	999,156	999,562	14,629	11,438	17,598	17,598	3,191	4,189	4,194	5,847	1,771	6,160		0,786	
16:47	28,2	0,1	180		0,268	16,08	998,997	999,320	0,268	15,645	13,459	17,614	17,628	2,185	4,188	4,191	2,438	0,738	4,154		0,100
16:50	55,1	0,2	180		0,268	16,08	998,952	999,311	0,268	15,927	13,531	17,610	17,626	2,396	4,188	4,190	2,672	0,809	4,079		0,195
16:55	81,7	0,3	180		0,268	16,08	998,927	999,292	0,268	16,083	13,678	17,623	17,631	2,405	4,188	4,190	2,681	0,812	3,945		0,289
11:19	110,1	0,4	180	68	0,268	16,08	999,173	999,509	0,268	14,514	11,920	16,077	16,080	2,594	4,189	4,193	2,894	0,876	4,157		0,389
11:22	132,7	0,5	180		0,268	16,08	999,161	999,497	0,268	14,590	12,025	16,076	16,080	2,565	4,189	4,193	2,862	0,866	4,051	4	0,469
11:26	164,8	0,6	180		0,268	16,08	999,148	999,483	0,268	14,677	12,145	16,076	16,082	2,531	4,189	4,193	2,824	0,855	3,931		0,583
12:04	194,5	0,7	180		0,268	16,08	999,144	999,497	0,268	14,708	12,025	16,160	16,171	2,683	4,189	4,193	2,993	0,906	4,136		0,688
12:08	203,2	0,7x	180		0,268	16,08	999,133	999,480	0,268	14,782	12,169	16,175	16,185	2,613	4,189	4,193	2,916	0,883	4,006		0,719
12:11	221,4	0,8	180		0,268	16,08	999,124	999,467	0,268	14,840	12,278	16,194	16,201	2,561	4,189	4,192	2,857	0,865	3,916		0,783
12:18	28,8	0,1	180		0,129	7,74	999,065	999,426	0,129	15,216	12,613	16,218	16,225	2,603	4,189	4,192	1,398	0,423	3,605		0,102
12:23	55,1	0,2	180		0,129	7,74	999,037	999,420	0,129	15,392	12,665	16,220	16,232	2,727	4,189	4,192	1,465	0,443	3,555		0,195
12:26	81,5	0,3	180		0,129	7,74	999,026	999,417	0,129	15,464	12,694	16,228	16,236	2,770	4,189	4,192	1,488	0,450	3,534		0,288
12:29	109,5	0,4	180		0,129	7,74	999,015	999,410	0,129	15,529	12,750	16,237	16,241	2,778	4,188	4,191	1,492	0,452	3,487		0,387
12:33	132,8	0,5	180	41	0,129	7,74	999,011	999,411	0,129	15,554	12,743	16,242	16,246	2,811	4,188	4,192	1,509	0,457	3,499	3,5	0,470
12:38	164,6	0,6	180		0,129	7,74	999,004	999,402	0,129	15,597	12,819	16,251	16,258	2,778	4,188	4,191	1,492	0,452	3,432		0,582
12:53	194,4	0,7	180		0,129	7,74	998,997	999,397	0,129	15,644	12,860	16,314	16,322	2,783	4,188	4,191	1,495	0,453	3,454		0,688
12:56	203,2	0,7x	180		0,129	7,74	998,989	999,395	0,129	15,694	12,875	16,331	16,340	2,819	4,188	4,191	1,514	0,458	3,455		0,719
13:02	222,3	0,8	180		0,129	7,74	998,983	999,394	0,129	15,730	12,883	16,362	16,368	2,847	4,188	4,191	1,529	0,463	3,479		0,786

### TwinSheet-Muster Betriebszustand (Messreihe 1)



### TwinSheet-Muster Einfluss Fließgeschwindigkeit (Messreihe 2)



## Anhang V Messdaten am „Stegplattenmuster“

Stegplattenmuster Betriebszustand (Messreihe 1)															
Zeitpunkt [hh:mm]	Q <sub>Rinne</sub> [l/s]	h <sub>WSP</sub> [cm]	n <sub>UWP</sub> [%]	Q <sub>WOA</sub> [l/s]	Q <sub>WOA</sub> [l/min]	ρ <sub>RL,CH1</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	ρ <sub>VL,CH2</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>m</sub> [kg/s]	T <sub>RL,CH1</sub> [°C]	T <sub>VL,CH2</sub> [°C]	T <sub>RI,CH3</sub> [°C]	T <sub>RI,CH4</sub> [°C]	Δθ <sub>RI,CH-VL</sub> [K]	c <sub>p,CH1</sub> [kJ/(kg·K)]	c <sub>p,CH2</sub> [kJ/(kg·K)]
15:37	28,9	180	100	0,271	16,260	999,777	999,905	0,271	9,042	6,864	13,040	13,040	2,178	4,197	4,201
15:40	28,9	180	90	0,240	14,402	999,758	999,902	0,240	9,273	6,941	13,042	13,041	2,332	4,196	4,201
15:43	28,9	180	80	0,210	12,592	999,738	999,899	0,210	9,530	7,015	13,047	13,046	2,515	4,196	4,201
15:45	28,9	180	70	0,178	10,680	999,711	999,894	0,178	9,857	7,120	13,049	13,050	2,737	4,195	4,201
16:17	28,9	180	60	0,146	8,761	999,687	999,898	0,146	10,143	7,038	13,085	13,087	3,106	4,195	4,201
16:19	28,9	180	50	0,114	6,838	999,649	999,897	0,114	10,569	7,064	13,086	13,094	3,505	4,194	4,201
16:22	28,9	180	41	0,089	5,326	999,616	999,892	0,089	10,928	7,157	13,091	13,087	3,771	4,194	4,201
17:07	28,9	180	100	0,272	16,318	999,689	999,818	0,272	10,119	8,454	13,120	13,127	1,666	4,195	4,198
17:10	28,9	180	90	0,241	14,463	999,675	999,814	0,241	10,277	8,511	13,121	13,127	1,766	4,195	4,198
17:13	28,9	180	80	0,210	12,614	999,657	999,809	0,210	10,481	8,591	13,125	13,123	1,890	4,195	4,198
17:15	28,9	180	70	0,179	10,739	999,635	999,804	0,179	10,717	8,655	13,126	13,130	2,063	4,194	4,198
17:39	28,9	180	60	0,147	8,815	999,617	999,805	0,147	10,919	8,641	13,142	13,143	2,278	4,194	4,198
17:42	28,9	180	50	0,114	6,844	999,582	999,810	0,114	11,257	8,574	13,145	13,152	2,683	4,194	4,198
17:45	28,9	180	41	0,089	5,341	999,550	999,808	0,089	11,547	8,602	13,151	13,151	2,945	4,193	4,198
11:02	29,2	180	100	0,272	16,330	999,694	999,784	0,272	10,072	8,940	12,115	12,115	1,132	4,195	4,197
11:05	29,2	180	90	0,241	14,490	999,680	999,780	0,241	10,219	9,005	12,121	12,122	1,214	4,195	4,197
11:07	29,2	180	80	0,210	12,626	999,668	999,776	0,210	10,356	9,055	12,126	12,129	1,301	4,195	4,197
11:10	29,2	180	70	0,179	10,740	999,654	999,771	0,179	10,516	9,112	12,137	12,132	1,404	4,194	4,197
11:12	29,2	180	60	0,147	8,831	999,638	999,767	0,147	10,690	9,158	12,141	12,140	1,532	4,194	4,197
11:22	29,2	180	50	0,114	6,851	999,627	999,765	0,114	10,809	9,191	12,156	12,155	1,618	4,194	4,197
11:25	29,2	180	41	0,089	5,358	999,595	999,769	0,089	11,132	9,138	12,176	12,172	1,994	4,194	4,197
13:21	29,1	180	100	0,273	16,361	999,586	999,641	0,273	11,222	10,650	12,202	12,207	0,572	4,194	4,194
13:24	29,1	180	90	0,242	14,520	999,578	999,637	0,242	11,289	10,700	12,214	12,207	0,589	4,194	4,194
13:27	29,1	180	80	0,211	12,659	999,569	999,634	0,211	11,371	10,737	12,212	12,207	0,635	4,194	4,194
13:29	29,1	180	70	0,179	10,751	999,559	999,629	0,179	11,461	10,788	12,214	12,216	0,673	4,194	4,194
13:40	29,1	180	60	0,147	8,839	999,560	999,648	0,147	11,458	10,578	12,248	12,243	0,880	4,194	4,194
13:43	29,1	180	50	0,115	6,893	999,544	999,640	0,115	11,596	10,663	12,249	12,252	0,933	4,193	4,194
13:46	29,1	180	41	0,089	5,364	999,530	999,634	0,089	11,729	10,732	12,262	12,259	0,997	4,193	4,194



Stegplattenmuster Einfluss Fließgeschwindigkeit (Messreihe 2)																					
Zeitpunkt [hh:mm]	Q <sub>Rinne</sub> [l/s]	V <sub>Rinne</sub> [m/s]	h <sub>WSP</sub> [cm]	n <sub>UWP</sub> [%]	Q <sub>WOA</sub> [l/s]	Q <sub>WOA</sub> [l/min]	ρ <sub>RL,CH1</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	ρ <sub>VL,CH2</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>m</sub> [kg/s]	T <sub>RL,CH1</sub> [°C]	T <sub>VL,CH2</sub> [°C]	T <sub>RL,CH3</sub> [°C]	T <sub>RL,CH4</sub> [°C]	Δθ <sub>RL-VL</sub> [K]	C <sub>p,CH1</sub> [kJ/(kg·K)]	C <sub>p,CH2</sub> [kJ/(kg·K)]	Q <sub>th</sub> [kW]	q̇ <sub>th</sub> [kW/m <sup>2</sup> ]	Δθ <sub>RL,CH3-VL</sub> [K]	Δθ <sub>RL,CH3-VL</sub> [K]	V <sub>Rinne</sub> [m/s]
16:33	28,9	0,1	180	100	0,271	16,26	999,828	999,936	0,271	8,315	6,108	12,301	12,303	2,208	4,198	4,203	2,503	1,063	6,193	6	0,102
16:37	54,8	0,2	180		0,271	16,26	999,810	999,932	0,271	8,577	6,195	12,295	12,300	2,381	4,198	4,203	2,700	1,147	6,100		0,194
16:41	81,2	0,3	180		0,271	16,26	999,796	999,928	0,271	8,771	6,311	12,301	12,303	2,461	4,197	4,202	2,789	1,185	5,991		0,287
12:37	110,4	0,4	180		0,271	16,26	999,818	999,946	0,271	8,456	5,897	11,948	11,949	2,559	4,198	4,203	2,901	1,232	6,051		0,390
12:40	132,5	0,5	180		0,271	16,26	999,836	999,966	0,271	8,198	5,570	11,656	11,657	2,628	4,199	4,204	2,981	1,266	6,086		0,469
12:43	164	0,6	180		0,271	16,26	999,829	999,959	0,271	8,304	5,688	11,658	11,660	2,616	4,198	4,204	2,967	1,261	5,970		0,580
12:45	193,6	0,7	180		0,271	16,26	999,825	999,957	0,271	8,359	5,715	11,664	11,664	2,644	4,198	4,204	2,999	1,274	5,950		0,685
12:47	203,2	0,7x	180		0,271	16,26	999,817	999,956	0,271	8,468	5,729	11,685	11,685	2,738	4,198	4,204	3,105	1,319	5,956		0,719
13:07	221,5	0,8	180		0,271	16,26	999,822	999,958	0,271	8,400	5,701	11,711	11,713	2,699	4,198	4,204	3,061	1,300	6,010		0,783
14:25	28,7	0,1	180	100	0,271	16,26	999,783	999,875	0,271	8,960	7,491	11,657	11,655	1,469	4,197	4,200	1,664	0,707	4,166	4	0,102
14:27	55,1	0,2	180		0,271	16,26	999,768	999,874	0,271	9,144	7,523	11,653	11,651	1,622	4,197	4,200	1,836	0,780	4,131		0,195
14:30	81	0,3	180		0,271	16,26	999,759	999,870	0,271	9,263	7,603	11,651	11,656	1,660	4,196	4,200	1,880	0,798	4,048		0,286
14:33	110,3	0,4	180		0,271	16,26	999,750	999,866	0,271	9,376	7,678	11,654	11,656	1,698	4,196	4,200	1,922	0,817	3,976		0,390
14:35	132,6	0,5	180		0,271	16,26	999,746	999,864	0,271	9,428	7,726	11,656	11,657	1,703	4,196	4,200	1,928	0,819	3,931		0,469
15:11	164,7	0,6	180		0,271	16,26	999,751	999,873	0,271	9,361	7,535	11,702	11,705	1,826	4,196	4,200	2,067	0,878	4,167		0,583
15:13	193,8	0,7	180		0,271	16,26	999,746	999,871	0,271	9,420	7,571	11,710	11,711	1,849	4,196	4,200	2,094	0,889	4,139		0,685
15:15	203,3	0,7x	180		0,271	16,26	999,744	999,869	0,271	9,454	7,630	11,718	11,717	1,824	4,196	4,200	2,065	0,877	4,089		0,719
15:19	222,1	0,8	180		0,271	16,26	999,737	999,863	0,271	9,535	7,744	11,737	11,740	1,791	4,196	4,200	2,027	0,861	3,993		0,786
16:15	28,6	0,1	180	41	0,089	5,34	999,668	999,843	0,089	10,351	8,104	11,711	11,711	2,247	4,195	4,199	0,835	0,355	3,606	3,5	0,101
16:19	55,7	0,2	180		0,089	5,34	999,636	999,843	0,089	10,706	8,102	11,704	11,706	2,604	4,194	4,199	0,968	0,411	3,602		0,197
16:21	81,6	0,3	180		0,089	5,34	999,632	999,844	0,089	10,760	8,089	11,705	11,705	2,671	4,194	4,199	0,993	0,422	3,615		0,289
16:24	109,3	0,4	180		0,089	5,34	999,627	999,841	0,089	10,815	8,125	11,710	11,712	2,689	4,194	4,199	1,000	0,425	3,584		0,387
16:27	132,2	0,5	180		0,089	5,34	999,623	999,838	0,089	10,858	8,177	11,712	11,713	2,681	4,194	4,199	0,997	0,423	3,535		0,468
16:30	164,8	0,6	180		0,089	5,34	999,619	999,839	0,089	10,896	8,160	11,716	11,717	2,736	4,194	4,199	1,017	0,432	3,556		0,583
16:33	194,4	0,7	180		0,089	5,34	999,618	999,839	0,089	10,916	8,164	11,724	11,726	2,752	4,194	4,199	1,023	0,434	3,560		0,688
16:36	202,9	0,7x	180		0,089	5,34	999,615	999,836	0,089	10,939	8,194	11,740	11,741	2,746	4,194	4,199	1,021	0,434	3,547		0,718
16:40	222	0,8	180		0,089	5,34	999,613	999,838	0,089	10,967	8,175	11,757	11,761	2,792	4,194	4,199	1,038	0,441	3,582		0,785

## Messdaten am „Spiralmuster“

Spiralmuster Betriebszustand (Messreihe 1)																			
Zeitpunkt [hh:mm]	Q <sub>Rinne</sub> [l/s]	h <sub>WSP</sub> [cm]	n <sub>UWP</sub> [%]	Q <sub>WQA</sub> [l/s]	Q <sub>WQA</sub> [l/min]	ρ <sub>RL,CH1</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	ρ <sub>VL,CH2</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>im</sub> [kg/s]	T <sub>RL,CH1</sub> [°C]	T <sub>VL,CH2</sub> [°C]	T <sub>RI,CH3</sub> [°C]	T <sub>RI,CH4</sub> [°C]	Δθ <sub>RL-VL</sub> [K]	C <sub>p,CH1</sub> [kJ/(kg·K)]	C <sub>p,CH2</sub> [kJ/(kg·K)]	Q̇ <sub>th</sub> [kW]	q̇ <sub>th</sub> [kW/m <sup>2</sup> ]	Δθ <sub>RI,CH3-VL</sub> [K]	Δθ <sub>RI,CH3-VL</sub> [K]
14:24	30,1	180	100	0,249	14,939	999,866	1000,000	0,249	7,673	4,926	9,464	9,363	2,748	4,200	4,205	2,865	0,754	4,539	4,5
14:27	30,1	180	90	0,215	12,901	999,855	999,999	0,215	7,904	5,021	9,480	9,382	2,883	4,199	4,205	2,596	0,683	4,459	
14:45	30,1	180	80	0,183	10,973	999,837	1000,000	0,183	8,180	4,977	9,540	9,448	3,202	4,199	4,205	2,452	0,645	4,563	
14:47	30,1	180	70	0,151	9,060	999,818	1000,000	0,151	8,451	5,001	9,545	9,462	3,450	4,198	4,205	2,181	0,574	4,544	
14:50	30,1	180	60	0,120	7,213	999,798	999,996	0,120	8,743	5,067	9,551	9,478	3,675	4,198	4,205	1,849	0,487	4,484	
15:06	30,1	180	50	0,090	5,400	999,778	999,994	0,090	9,025	5,106	9,570	9,512	3,920	4,197	4,205	1,476	0,388	4,465	3,0
15:08	30,1	180	41	0,067	4,030	999,765	999,990	0,067	9,185	5,174	9,576	9,537	4,010	4,197	4,205	1,127	0,297	4,402	
13:55	29,7	180	100	0,248	14,877	999,895	999,988	0,248	7,104	5,198	8,356	8,369	1,906	4,201	4,205	1,980	0,521	3,158	
13:58	29,7	180	90	0,214	12,842	999,885	999,983	0,214	7,291	5,283	8,374	8,376	2,007	4,200	4,204	1,799	0,474	3,091	1,5
14:00	29,7	180	80	0,182	10,918	999,875	999,979	0,182	7,493	5,348	8,392	8,367	2,145	4,200	4,204	1,635	0,430	3,044	
14:03	29,7	180	70	0,150	9,014	999,865	999,976	0,150	7,692	5,403	8,402	8,365	2,289	4,200	4,204	1,440	0,379	2,999	
14:20	29,7	180	60	0,119	7,148	999,855	999,977	0,119	7,908	5,389	8,434	8,390	2,519	4,199	4,204	1,256	0,331	3,045	
14:22	29,7	180	50	0,089	5,362	999,842	999,979	0,089	8,117	5,344	8,470	8,431	2,773	4,199	4,204	1,037	0,273	3,126	
14:25	29,7	180	41	0,066	3,986	999,831	999,976	0,066	8,271	5,406	8,476	8,449	2,864	4,198	4,204	0,797	0,210	3,070	1,5
15:57	29,2	180	100	0,250	15,012	999,868	999,915	0,250	7,647	6,629	8,322	8,275	1,019	4,200	4,202	1,067	0,281	1,694	
16:00	29,2	180	90	0,217	12,997	999,863	999,912	0,217	7,742	6,699	8,321	8,278	1,043	4,200	4,202	0,945	0,249	1,622	
16:02	29,2	180	80	0,184	11,035	999,858	999,910	0,184	7,846	6,758	8,324	8,287	1,088	4,199	4,201	0,837	0,220	1,566	
16:05	29,2	180	70	0,152	9,109	999,853	999,908	0,152	7,943	6,795	8,328	8,293	1,148	4,199	4,201	0,729	0,192	1,533	
16:07	29,2	180	60	0,120	7,228	999,847	999,906	0,120	8,047	6,853	8,327	8,301	1,193	4,199	4,201	0,601	0,158	1,473	
17:00	29,2	180	50	0,090	5,385	999,840	999,909	0,090	8,148	6,768	8,352	8,327	1,379	4,199	4,201	0,518	0,136	1,583	
17:02	29,2	180	41	0,067	4,022	999,834	999,911	0,067	8,228	6,715	8,372	8,345	1,513	4,199	4,202	0,424	0,112	1,656	

Spiralmuster Einfluss Fließgeschwindigkeit (Messreihe 2)																					
Zeitpunkt [hh:mm]	Q <sub>Rinne</sub> [l/s]	V <sub>Rinne</sub> [m/s]	h <sub>WSP</sub> [cm]	η <sub>UWP</sub> [%]	Q <sub>WOA</sub> [l/s]	Q <sub>WOA</sub> [l/min]	ρ <sub>RL,CH1</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	ρ <sub>VL,CH2</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	q̇ <sub>m</sub> [kg/s]	T <sub>RL,CH1</sub> [°C]	T <sub>VL,CH2</sub> [°C]	T <sub>RL,CH3</sub> [°C]	T <sub>RL,CH4</sub> [°C]	Δθ <sub>RL-VL</sub> [K]	c <sub>p,CH1</sub> [kJ/(kg·K)]	c <sub>p,CH2</sub> [kJ/(kg·K)]	Q̇ <sub>th</sub> [kW]	q̇ <sub>th</sub> [kW/m <sup>2</sup> ]	Δθ <sub>RL,CH3-VL</sub> [K]	Δθ <sub>RI,CH3-VL</sub> [K]	V <sub>Rinne</sub> [m/s]
15:22	29	0,1	180	100	0,25	15	999,853	999,975	0,250	7,937	5,420	9,600	9,498	2,518	4,199	4,204	2,635	0,693	4,180	4	0,103
15:25	55,5	0,2	180		0,25	15	999,843	999,969	0,250	8,093	5,514	9,582	9,537	2,579	4,199	4,204	2,699	0,710	4,068		0,196
15:28	81,1	0,3	180		0,25	15	999,837	999,962	0,250	8,180	5,632	9,575	9,542	2,548	4,199	4,204	2,666	0,702	3,943		0,287
15:57	109,8	0,4	180		0,25	15	999,834	999,970	0,250	8,229	5,503	9,689	9,658	2,726	4,199	4,204	2,853	0,751	4,186		0,388
15:59	132,2	0,5	180		0,25	15	999,831	999,964	0,250	8,275	5,598	9,686	9,659	2,677	4,198	4,204	2,801	0,737	4,088		0,468
16:02	164,1	0,6	180		0,25	15	999,828	999,961	0,250	8,314	5,656	9,682	9,663	2,658	4,198	4,204	2,781	0,732	4,026		0,580
16:04	193,7	0,7	180		0,25	15	999,825	999,956	0,250	8,364	5,736	9,685	9,673	2,628	4,198	4,204	2,749	0,723	3,949		0,685
16:45	202,8	0,7x	180		0,25	15	999,813	999,955	0,250	8,536	5,754	9,936	9,920	2,782	4,198	4,203	2,910	0,766	4,182		0,717
16:48	221,8	0,8	180		0,25	15	999,809	999,948	0,250	8,581	5,862	9,946	9,931	2,720	4,198	4,203	2,845	0,749	4,084		0,784
15:28	28,8	0,1	180	45	0,074	4,44	999,806	999,978	0,074	8,630	5,374	8,934	8,895	3,256	4,198	4,204	1,008	0,265	3,561	3,5	0,102
15:32	55,5	0,2	180		0,074	4,44	999,798	999,975	0,074	8,744	5,425	8,949	8,930	3,319	4,198	4,204	1,028	0,270	3,525		0,196
15:35	81,3	0,3	180		0,074	4,44	999,797	999,974	0,074	8,763	5,426	8,955	8,942	3,337	4,197	4,204	1,033	0,272	3,529		0,288
15:38	109,6	0,4	180		0,074	4,44	999,796	999,973	0,074	8,778	5,446	8,955	8,945	3,332	4,197	4,204	1,032	0,272	3,509		0,388
15:40	132,5	0,5	180		0,074	4,44	999,795	999,971	0,074	8,788	5,476	8,958	8,948	3,312	4,197	4,204	1,025	0,270	3,482		0,469
15:43	164,4	0,6	180		0,074	4,44	999,794	999,968	0,074	8,801	5,541	8,965	8,957	3,259	4,197	4,204	1,009	0,266	3,424		0,581
16:05	193,6	0,7	180		0,074	4,44	999,786	999,966	0,074	8,916	5,566	9,095	9,087	3,350	4,197	4,204	1,037	0,273	3,529		0,685
16:07	203	0,7x	180		0,074	4,44	999,785	999,966	0,074	8,935	5,561	9,108	9,100	3,374	4,197	4,204	1,045	0,275	3,547		0,718
16:11	222,5	0,8	180		0,074	4,44	999,783	999,967	0,074	8,954	5,552	9,125	9,120	3,401	4,197	4,204	1,053	0,277	3,573		0,787

## Anhang VII Messergebnisse ADV

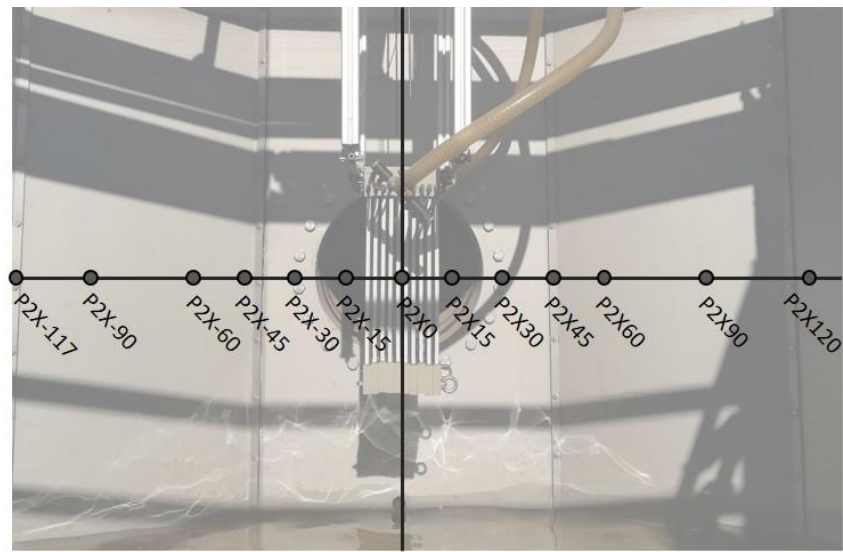
Messdaten „TwinSheet“-Muster und beispielhaftes Messraster für Position 2 (nach WQA)

ADV Messergebnisse TwinSheet-Muster							
Position 1 (vor WQA)				Position 2 (nach WQA)			
Messpunkt	$v_m$ [m/s]	$Cor_m$ [%]	$SNR_m$ [dB]	Messpunkt	$v_m$ [m/s]	$Cor_m$ [%]	$SNR_m$ [dB]
P1Y56	0,076	89,4	10,5	P2Y56	0,249	91,3	13,2
P1Y45	0,051	87,4	9,8	P2Y45	0,343	91,1	13,7
P1Y30	0,339	91,1	14,7	P2Y30	0,432	91,1	14,6
P1Y15	0,684	91,2	16,3	P2Y15	0,345	91,5	14,8
P1Y0	0,655	90,9	16,8	P2Y0	0,124	92,5	13,9
P1Y-15	0,678	91,2	16,2	P2Y-15	0,221	91,8	14,1
P1Y-30	0,607	90,5	15,6	P2Y-30	0,435	90,9	14,6
P1Y-45	0,135	90,3	11,4	P2Y-45	0,411	90,6	13,8
P1Y-60	0,062	89,7	11,4	P2Y-55	0,183	91,2	12,5
P1Y-75	0,139	77,9	16,2	P2Y-75	0,124	80,9	17,9



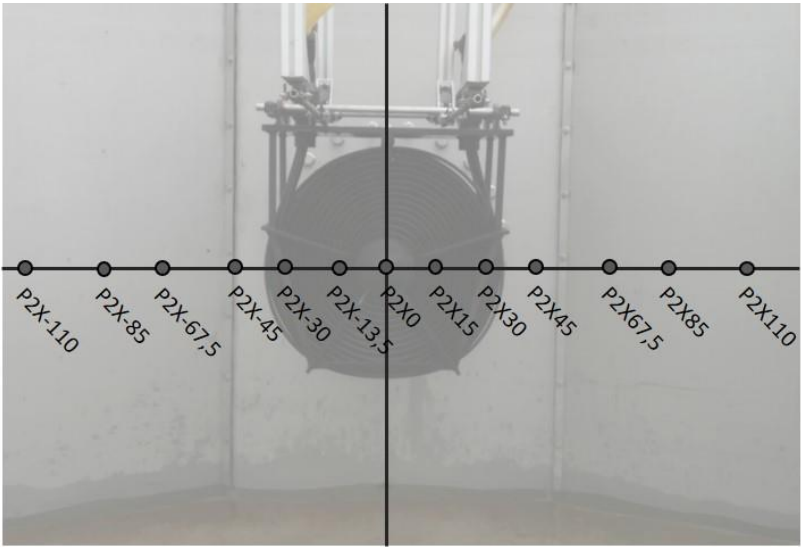
Messdaten „Stegplattenmuster“ und beispielhaftes Messraster für Position 2 (nach WQA)

ADV Messergebnisse Stegplattenmuster							
Position 1 (vor WQA)				Position 2 (nach WQA)			
Messpunkt	$v_m$ [m/s]	$Cor_m$ [%]	$SNR_m$ [dB]	Messpunkt	$v_m$ [m/s]	$Cor_m$ [%]	$SNR_m$ [dB]
P1X100	0,085	87,9	9,9	P2X120	0,095	87,4	8,7
P1X75	0,092	87,0	9,7	P2X90	0,083	87,2	8,6
P1X60	0,105	86,9	9,8	P2X60	0,149	88,9	10,2
P1X45	0,1	86,7	10,0	P2X45	0,305	88,3	11,7
P1X30	0,605	86,3	15,4	P2X30	5,51	87,7	13,0
P1X15	0,724	87,1	16,5	P2X15	0,538	90,1	12,9
P1X0	0,662	88,5	15,1	P2X0	0,391	91,0	14,7
P1X-15	0,677	88,6	15,0	P2X-15	0,512	90,2	13,8
P1X-30	0,557	88,4	14,2	P2X-30	0,435	90,0	12,7
P1X-45	0,12	88,2	9,6	P2X-45	0,33	90,4	12,2
P1X-60	0,092	88,5	9,6	P2X-60	0,148	90,6	11,2
P1X-75	0,072	87,9	9,2	P2X-90	0,097	88,7	8,9
P1X-100	0,071	87,8	8,9	P2X-117	0,111	88,7	8,9



Messdaten „Spiralmuster“ und beispielhaftes Messraster für Position 2 (nach WQA)

ADV Messergebnisse Spiralmuster							
Position 1 (vor WQA)				Position 2 (nach WQA)			
Messpunkt	$v_m$ [m/s]	$Cor_m$ [%]	$SNR_m$ [dB]	Messpunkt	$v_m$ [m/s]	$Cor_m$ [%]	$SNR_m$ [dB]
P1X90	0,179	88,8	11,2	P2X110	0,119	90,1	15,9
P1X75	0,126	88,8	11,0	P2X85	0,182	89,3	14,3
P1X60	0,118	88,5	10,8	P2X67,5	0,377	87,8	13,7
P1X45	0,105	88,6	10,4	P2X45	0,218	89,3	13,1
P1X30	0,442	87,6	14,6	P2X30	0,113	91,2	12,3
P1X15	0,693	88,3	14,8	P2X15	0,12	90,8	12,1
P1X0	0,594	87,9	15,2	P2X0	0,149	89,4	14,9
P1X-15	0,628	88,1	15,1	P2X-13,5	0,122	89,6	13,5
P1X-30	0,336	88,6	14,0	P2X-30	0,125	89,7	12,9
P1X-45	0,113	89,0	11,3	P2X-45	0,117	89,3	12,8
P1X-60	0,125	89,1	10,7	P2X-67,5	0,395	87,6	14,4
P1X-75	0,15	88,8	10,4	P2X-85	0,289	88,6	13,5
P1X-90	0,144	89,2	10,4	P2X-110	0,152	89,2	12,8





Abschlussarbeit von

Frau Franziska Baunach

**Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22, Abs. 7 APB**

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben.

Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden.

Diese Arbeit hat in gleicher Form oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 23.12.2019

---

Franziska Baunach